

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Měření základních konstant magnetického materiálu digitální metodou
Measurement of Basic Constants of Magnetic Material by Digital Method

Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Pavluš**
Studijní program: B0714A150001 Řídicí a informační systémy
Téma: Měření základních konstant magnetického materiálu digitální metodou
Measurement of Basic Constants of Magnetic Material by Digital Method
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je digitalizace měření vzorků magnetických materiálů v laboratorní úloze.

Body zadání:

1. Studium metod měření magnetických materiálů.
2. Zobrazení hysterezní smyčky a její digitalizace.
3. Automatizované centrování hysterezní smyčky.
4. Měření charakteristických konstant (B_r , H_c) a ztrát v magnetickém materiálu digitální cestou.
5. Tvorba softwarové aplikace pro automatizované měření charakteristických konstant a ztrát magnetických materiálů.
6. Ověření funkčnosti aplikace. (praktická měření)
7. Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DUFEK, Milan, Jaroslav HRABÁK a Zdeněk TRNKA. *Magnetická měření*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2] FIORILLO, Fausto. *Measurement and characterization of magnetic materials*. Amsterdam : North-Holland, 2004. Elsevier series in electromagnetism. ISBN 0-12-257251-3.
- [3] BARTUŠEK, Karel a kol. *Měření v elektrotechnice*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [4] HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [5] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0.
- [6] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I: učební text*. [CD-ROM] Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3395-8.
- [7] JOHNSON, Gary W. a Richard JENNINGS. *LabVIEW graphical programming*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 0-07-145146-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 14. Května 2020



.....
Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultace při tvorbě práce. Poděkování patří i doc. Ing. Ludvíku Kovalovi, Ph.D. za spolupráci při výběru práce a uvedení do problematiky.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je vytvoření SW aplikace pro automatizaci měření charakteristických konstant vzorků magnetických materiálů. Bakalářská práce obsahuje podrobný rozbor metod měření měkkých a tvrdých magnetických materiálů. Jsou zde popsány i způsoby měření magnetického pole. Součástí bakalářské práce je i popis hysterezní smyčky a typických charakteristických hodnot získaných v průběhu měření. Práce se věnuje i popisu vlastností navržené SW aplikace včetně ověření její funkčnosti během měření.

Klíčová slova

Magnetické pole, hysterezní křivka, charakteristické hodnoty

Abstract

The supposed bachelor thesis is the application of SW application for automation of measurement of characteristic constants on samples of magnetic materials. The bachelor thesis contains a detailed analysis of methods of measurement of soft and hard magnetic materials. Methods of magnetic field measurement are also described. Part of the bachelor thesis is also a description of hysteresis loops and typical characteristic values obtained during the analysis. The thesis also describes the characteristics of the SW application, including the submission of functional useful during measurement.

Keywords

Magnetic field, hysteresis loop, characteristic values

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých symbolů a zkratk	10
Seznam obrázků a tabulek.....	13
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	14
Úvod.....	15
1. Metody a měření magnetických materiálů	16
1.1. Magnetické převodníky.....	16
1.1.1. Indukční cívka	16
1.1.2. Rogowskiho-Chattockův potenciometr	17
1.1.3. Rotační a vibrační sondy	18
1.1.4. Feromagnetická sonda (fluxgate)	18
1.1.5. Hallova sonda.....	18
1.1.6. Magnetorezistivní převodník.....	19
1.1.7. Vláknové a magnetooptické senzory.....	20
1.1.8. SQUID převodník	21
1.2. Měření vlastností feromagnetických materiálů	22
1.2.1. Měření vlastností feromagnetických materiálu	22
1.2.2. Vzorky materiálu.....	23
1.3. Měření magnetizačních charakteristik na uzavřených vzorcích.....	23
1.3.2. Měření při stejnosměrném magnetování	25
1.3.3. Měření při střídavém magnetování.....	25
1.4. Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích	26
1.4.1. Magnetování otevřených vzorků.....	27
1.4.2. Určení intenzity při měření otevřených vzorků.....	27
1.4.3. Měření magnetizačních charakteristik magneticky tvrdých materiálů.....	28
1.4.4. Záznam charakteristiky MTM se změnou měřítka intenzity v 1.....	29
1.4.5. Stejnosměrná měření otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů	30
2. Zobrazení hysterezní smyčky a její digitalizace.....	31
2.1. Magnetizační charakteristiky	31
2.1.1. Křivka prvotní magnetizace	31

2.1.2.	Hysterezní křivka	31
2.2.	Digitalizace měření magnetizačních charakteristik	32
2.3.	Měření dalších parametrů	33
2.3.1.	Měření koercivity H_c	33
2.3.2.	Měření magnetostrikce	33
2.3.3.	Měření Curieovy teploty	34
2.3.4.	Měření anizotropie	34
2.4.	Měření dynamické hysterezní křivky	34
2.5.	Komunikace s měřicími přístroji ve vývojovém prostředí	35
2.5.1.	Výhody vývojového prostředí pro komunikaci s měřicími přístroji	35
2.5.2.	Komunikační rozhraní na straně měřících přístrojů	35
2.6.	SW podpora komunikace s měřicími přístroji	36
2.6.1.	Standardizace komunikace s přístrojem podle normy IEEE 488	36
2.6.2.	Standardizace komunikace s přístrojem podle VISA	36
2.6.3.	Přístrojové ovladače	37
3.	Automatizované centrování hysterezní smyčky	39
3.1.	Význam centrování hysterezní smyčky	39
3.2.	Způsoby centrování a zvolení vhodného centrování	39
3.3.	Rozbor a přesnost zvoleného centrování	40
4.	Měření charakteristických konstant (B_r, H_c) a ztrát v magnetickém materiálu digitální cestou ...	42
5.	Tvorba softwarové aplikace pro automatizované měření charakteristických konstant a ztrát magnetických materiálů	44
5.1.	Software a cíle aplikace	44
5.1.1.	Cíle a význam aplikace	44
5.1.2.	Zvolený software a první kroky	44
5.2.	Popis softwarové aplikace	45
5.2.1.	Načítání dat	45
5.2.2.	Ukládání souborů	46
5.2.3.	Zpracování příchozích dat po vykreslování	47
5.2.4.	Čelní (front) panel	52
6.	Ověření funkčnosti aplikace	54
6.1.	Zadání laboratorní úlohy	54
6.2.	Měření na prvním vzorku podle laboratorní úlohy pomocí vytvořené SW aplikace	57

6.2.1.	Zobrazení hysterezní smyčky a určení hodnot remanence a koercivity	57
6.2.2.	Měření komutační křivky	59
6.3.	Měření na druhém vzorku podle laboratorní úlohy pomocí vytvořené SW aplikace.....	63
6.3.1.	Zobrazení hysterezní smyčky a určení hodnot remanence a koercivity	63
6.3.2.	Měření komutační křivky	65
6.4.	Seznam použitých měřicích přístrojů	69
7.	Zhodnocení výsledků	75
	Seznam použitých zdrojů a literatury.....	77

Seznam použitých symbolů a zkratek

a	-	šířka
AMR	-	anizotropní magnetorezistor
B	T	magnetická indukce
b	-	výška
C	F	kondenzátor
B_{am}	T	amplitudová magnetická indukce
B_m	T	magnetická indukce nasycení
BH	J/m^3	měrná energie
B_{amax}	T	maximální amplitudová magnetická indukce
B_{max}	T	magnetická indukce nasycení
$-B_{max}$	T	magnetická indukce nasycení (v záporné části)
B_r	T	remanentní indukce
$-B_r$	T	remanentní indukce (v záporné části)
B_0	T	měřená magnetická indukce
CGSM	-	Gaussova soustava pro měření magnetické veličiny
D	$m \cdot H^{-1}$	demagnetizační činitel
D_1	-	vnitřní průměr toroidu
D_2	-	vnější průměr toroidu
d	-	průměr
f	Hz	frekvence
f_r	Hz	rezonanční frekvence
H	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
H_{am}	$A \cdot m^{-1}$	amplitudová intenzita magnetického pole
H_{amax}	$A \cdot m^{-1}$	maximální amplitudová intenzita magnetického pole
H_c	$A \cdot m^{-1}$	koercivita
$-H_c$	$A \cdot m^{-1}$	koercivita (v záporné části)
H_m	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole při nasycení
H_{max}	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole při nasycení
$-H_{max}$	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole při nasycení (v záporné části)
H_z	-	tečná složka intenzity
I_1	A	proud

I	A	naměřený proud
I_m	A	amplitudová hodnota magnetizačního proudu
i_M	A	magnetovací proud
l_s	m	střední délka siločar
J	T	magnetické polarizace
J_m	T	magnetická indukce nasycení
J_r	T	remanence
J_s	T	magnetická polarizace
MKSA	-	metrická soustava základních fyzikálních veličin
MTM	-	magneticky tvrdé materiály
N	-	počet závitů cívky
N_1	-	počet závitů primárního vinutí
N_2	-	počet závitů sekundárního vinutí
P_d	-	přídavné ztráty
P_h	-	hysterezní ztráty
P_y	-	ztráty vířivými proudy
r	-	poloměr
R	Ω	odpor
RC	-	článek složený z rezistoru a kondenzátoru
RCP	-	Rogowskiho-Chattockův potenciometr
R_H	Ω	odpor
S	m^2	průřez jádra vzorku
S_c	m^2	plocha (obsah) cívky
SI	-	mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin
SQUID	-	Superconducting Quantum Interface Device (supravodivé kvantové rozhraní)
SW	-	software
T_c	$^{\circ}C$	Curieova teplota
U_{2SA}	V	střední aritmetická hodnota indukovaného napětí
u_H	V	indukované napětí
U_m	V	napětí magnetické
X	-	vstup osciloskopu
x_H	$A \cdot m^{-1}$	vzdálenost pro posun po ose H
Y	-	vstup osciloskopu

y_B	T	vzdálenost pro posun po ose B
ZMP	-	zdroj magnetovacího proudu
μ	-	relativní permeabilita jádra
μ_{am}	$H \cdot m^{-1}$	amplitudová permeabilita
μ_{amax}	$H \cdot m^{-1}$	maximální amplitudová permeabilita
μ_0	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita vakua
Φ	Wb	magnetický tok

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1.1) Rogowskiho-Chattockův potenciometr pro měření změny magnetického napětí (U_m)[1]	17
Obr. 1.2) Provedení feromagnetické cívky se dvěma zapojenými jádry[1]	18
Obr. 1.3) Hallova sonda, konstrukční provedení[3]	19
Obr. 1.4) Princip magnetorezistivního převodníku [1]	20
Obr. 1.5) „Barbes poles“ převodníku AMR [1]	20
Obr. 1.6) VA charakteristika Josephsonova přechodu[1]	21
Obr. 1.7) Konstrukce stejnosměrného převodníku SQUID[1]	22
Obr. 1.8) Vzduchové mezery vinutých pásků v prstenci [2]	24
Obr. 1.9) Blokové schéma zapojení pro měření spojitým magnetováním [2]	25
Obr. 1.10) Blokové schéma zapojení pro měření střídavým magnetováním [2]	26
Obr. 1.11) Magnetování otevřených vzorků[2]	27
Obr. 1.12) Plochá cívka [2]	28
Obr. 1.13) RCP ve tvaru části kruhu[2]	28
Obr. 1.14) Charakteristika a) bez změny a b) se změnou měřítka[2]	30
Obr. 2.1) Magnetizační charakteristiky feromagnetického materiálu [1]	31
Obr. 2.2) Blokové schéma hysterezi grafu[1]	32
Obr. 2.3) Měření dynamické hysterezní křivky na prstencovém vzorku[3]	34
Obr. 2.4) Internetová stránka pro výběr ovladače	37
Obr. 2.5) Okno v LabVIEW pro vyhledávání a stahování ovladačů	38
Obr. 2.6) Paletová nabídka s ovladači	38
Obr. 3.1) Proložený jednou už vycentrovaný vzorek	41
Obr. 3.2) Dvakrát centrovaná křivka proložená třetím centrováním	41
Obr. 4.1) Zobrazení charakteristických konstant	42
Obr. 5.1) Nahrávání dat, dvě varianty	45
Obr. 5.2) Převod z řetězce 2D pole na 1D pole číselné	46
Obr. 5.3) Ukládání zvoleného průběhu	46
Obr. 5.4) Stav Aktuální křivka	47
Obr. 5.5) Centrování křivky	47
Obr. 5.6) SubVI použité ve struktuře pro centrování	48
Obr. 5.7) Vykreslení průběhu H v čase	48
Obr. 5.8) Vykreslení průběhu B v čase	49
Obr. 5.9) Vykreslení aktuální křivky a vycentrované křivky v jednom grafu	49
Obr. 5.10) Zastavení celého programu	50
Obr. 5.11) Získání charakteristických konstant	50
Obr. 5.12) SubVI pro získání charakteristických konstant	51
Obr. 5.13) Hlavní panel	52
Obr. 5.14) Hlavní panel, druhá záložka	53

Obr. 6.1) Schéma zapojení pro zobrazení hysterezní křivky.....	54
Obr. 6.2) Měření amplitudové charakteristiky	55
Obr. 6.3) Vykreslení hysterezní smyčky při správném zvolení RC článku u prvního vzorku	58
Obr. 6.4) Vykreslení hysterezní smyčky při špatném zvolení RC článku u prvního vzorku	58
Obr. 6.5) Charakteristické body pro správně zvolenou hysterezní smyčku u prvního vzorku.....	59
Obr. 6.6) Obrázek výsledných hodnot pro vyznačený řádek v tabulce.....	60
Obr. 6.7) Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek u prvního vzorku	61
Obr. 6.8) Závislost $B_m = f(H_m)$ z měření komutační křivky u prvního vzorku	62
Obr. 6.9) Vykreslení hysterezní smyčky při správném zvolení RC článku u druhého vzorku	63
Obr. 6.10) Vykreslení hysterezní smyčky při špatném zvolení RC článku u druhého vzorku	64
Obr. 6.11) Charakteristické body pro správně zvolenou hysterezní smyčku u druhého vzorku	64
Obr. 6.12) Obrázek výsledných hodnot pro vyznačený řádek v tabulce.....	66
Obr. 6.13) Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek u druhého vzorku.....	66
Obr. 6.14) Závislost $B_m = f(H_m)$ z měření komutační křivky u druhého vzorku	68
Obr. 6.15) Zapojení pro měření Hysterezní smyčky s RC článkem.....	69
Obr. 6.16) Generátor Instek GFG 8020H.....	70
Obr. 6.17) NF zesilovač	70
Obr. 6.18) Multimetr RANGE RE95	71
Obr. 6.19) Multimetr MASTECH MS8265	71
Obr. 6.20) Přípravek se snímacím odporem 8R2	72
Obr. 6.21) Přípravek s Toroidy	72
Obr. 6.22) Přípravek s kondenzátory	73
Obr. 6.23) Odporová dekáda.....	73
Obr. 6.24) Osciloskop Agilent DSO6012A	74

Seznam tabulek

Tab. 1) Hodnoty naměřené SW aplikací pro první vzorek.....	59
Tab. 2) Tabulka získaných hodnot pro komutační křivku prvního vzorku	60
Tab. 3) Hodnoty naměřené SW aplikací pro druhý vzorek.....	65
Tab. 4) Tabulka získaných hodnot pro komutační křivku druhého vzorku.....	65
Tab. 5) Použité měřicí přístroje.....	69

Úvod

Dnešní doba se soustředí na digitalizaci, zrychlení a usnadnění složitějších úkonů v praktické činnosti pomocí moderních technologií a SW aplikací. Tyto tendence se uplatňují i v procesu měření fyzikálních veličin. Samotné měření v sobě zahrnuje celou řadu kroků, které provází zdlouhavé procedury dopočítávání hodnot z indikačních prvků použitého zařízení či z naměřených hodnot z použitých měřicích přístrojů. Snahou je měření urychlit a dosáhnout omezení chyb, jež mohou vzniknout při měření.

První a druhá kapitola bakalářské práce je zaměřena z teoretického pohledu na měření magnetických polí. Kapitoly nabízí přehled metod měření a současně je objasněn princip, na němž konkrétní metoda funguje. Nechybí popis, za jakých podmínek se uplatňují, nebo jejich celkové využití v dnešní době. V teoretickém přehledu nechybí ani popis měření na otevřených a uzavřených vzorcích. Každá měřicí metoda má své výhody i nevýhody, racionálním zhodnocením těchto specifik pak uplatňujeme volbu vhodné měřicí metody pro získání charakteristických hodnot, které jsou cílem měření.

Třetí kapitola a čtvrtá kapitola bakalářské práce už je spojena s praktickou činností. Kapitoly obsahují popis variant centrování měřené hysterezní smyčky, zobrazování a vyznačení charakteristických bodů. Zvolený postup je zdůvodněný. Tato část obsahuje i praktické zobrazení, kde lze vidět přesnost vystředění hysterezní křivky. Ve čtvrté kapitole jsou podrobněji rozebrány charakteristické body, které bude vytvořená aplikace vyhodnocovat.

Popisu vytvořené SW aplikace je věnována pátá kapitola. Kapitola nabízí návody obsluhy aplikace od hlavního panelu, po jednotlivé části programu. U každé jednotlivé části programu najdeme řešení a princip jeho uplatnění v aplikaci. Pro přehlednost je program rozdělen i do tří úrovní dle jejich principu. A to konkrétně do ukládání, zpracování a nahrávání dat.

Závěrečné kapitoly jsou již odladěné algoritmy a zabývají se konkrétním měřením. Ověřuje se funkčnost aplikace a rozebírají se získané hodnoty z měření. Navržená aplikace by měla pomáhat při laboratorních měření hysterezní křivek. Je vytvořena pro další možnost zpracování naměřených hodnot, konkrétně pak pro porovnání výsledků četnějších měření.

1. Metody a měření magnetických materiálů

Měření magnetických materiálů je nedílnou součástí měření, ať už v různých silnoproudých nebo slaboproudých oborech elektrotechniky. V dnešní době se bez vysoce kvalitních magnetických materiálů neobejdeme. Nejen v elektrotechnice, ale také v dalších oblastech se tedy můžeme běžně s magnetickými měřeními setkávat, např. geologii, biologii, lékařství, vesmírném výzkumu.

V dnešní době se využívají pro označení jednotky ze soustavy SI. SI soustava byla modifikována ze soustavy MKSA. Existuje ještě soustava CGSM, která se dnes už u nás nepoužívá. Lze se s ní však v některých starších vydáních odborné literatury stále setkat. Zejména ve vydání ze zámoří, ale i v literatuře zabývající se magnetismem nebo feromagnetismem. Hlavní rozdíly u zmiňovaných soustav MKSA a CGSM vychází z odlišných způsobů odvození jednotek a převodů. [1][2][5]

1.1. Magnetické převodníky

Principem magnetického převodníku je převedení některé z magnetických veličin na elektrický signál. Mezi magnetické veličiny řadíme magnetickou indukci B , intenzitu magnetického pole H , permeabilitu μ , magnetický tok Φ a magnetické napětí U_m . V praxi pro měření magnetických polí vybíráme co nejvhodnější převodník. Volba převodníku je ovlivněna rozsahem měřené veličiny a požadovanou přesností měření v daném rozsahu. Jako magnetický převodník se využívá

- indukční cívka
- Hallova sonda
- feromagnetická sonda
- magnetorezistivní převodník
- SQUID
- převodník na principu jaderné magnetické rezonance. [1][2]

1.1.1. Indukční cívka

Citlivost měřící metody využívající indukční cívky závisí na kmitočtu měřeného magnetického pole f , a na parametrech spočívajících v počtu závitů měřící indukční cívky N a ploše cívky S_c . Platí zde, že čím větší hodnotu mají zmíněné parametry, tím je citlivost měřícího převodníku na bázi indukční cívky větší. Technicky je ale nemožné donekonečna zvětšovat dané parametry, a proto u cívkové plochy se může vyskytnout omezení, kdy konstrukční požadavky dosáhnou limitního rozměru čidla. Problém se nejčastěji řeší použitím vícevrstvé válcové cívky. V případě nehomogenního pole se u vícevrstvé válcové cívky měří průměrná hodnota magnetické indukce v objemu, přičemž kulová cívka by měla být pro tuto problematiku nejvhodnější. Problém nevýhody kulové cívky nastává v praxi, protože tento typ je špatně realizovatelný. Při řešení se využívají tenké válcové cívky v aproximované soustavě.

Při zvyšování počtu závitů musíme brát ohled i na rozměry a hmotnost cívky. Zvětšuje se délka vedení a tím zároveň roste činný odpor vinutí, popřípadě jeho parazitní kapacita. Odpor cívky může vyvolávat šum v okolí a ovlivnit elektronické obvody, nebo nevhodně vyvolávat rušení. Zase při

používání vysokých frekvencí můžeme mít problém s mezizávitovou parazitní kapacitou, která může ovlivnit navrhovanou funkčnost, popřípadě i její použitelnost. Problém s mezizávitovou kapacitou se v praxi může snížit křížovým vinutím cívek.

Pro měření velmi slabých magnetických polí, nebo nízkých kmitočtů se nabízí možnost využití feromagnetických materiálů jako jádra indukční cívky, které nám zvyšuje citlivost cívky.

$$B = \frac{\mu}{1 + (\mu - 1) \cdot D} \cdot B_0 \quad (T) \quad (1.1)$$

kde:

B... magnetická indukce

B₀... měřená magnetická indukce

D... demagnetizační činitel

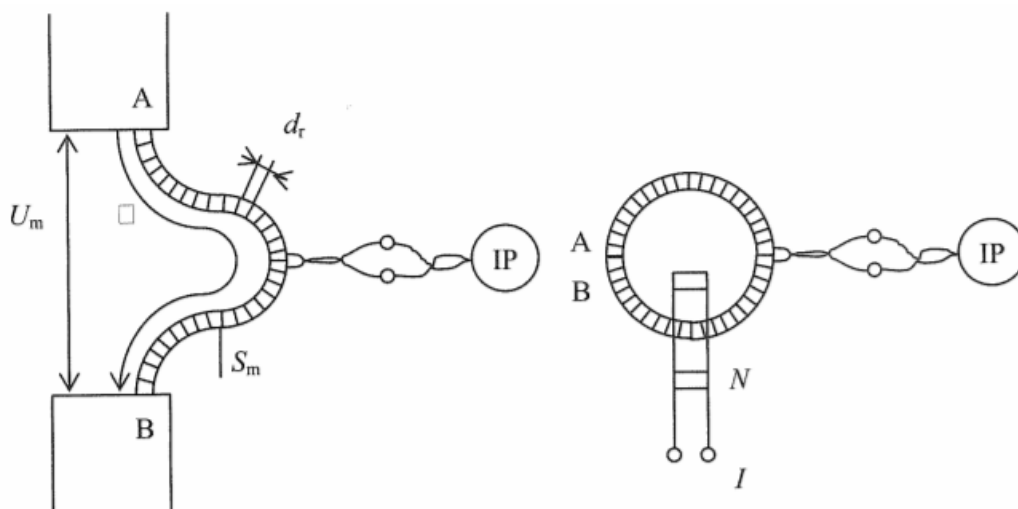
μ... relativní permeabilita jádra

Cívky s feromagnetickým jádrem mají ale celou řadu nevýhod. Vznikají nelinearity a zhoršují se další parametry měřicí cívky, jako jsou teplotní a kmitočtové závislosti. [2]

1.1.2. Rogowskiho-Chattockův potenciometr

Rogowskiho-Chattockův potenciometr neboli RCP nám umožňuje měřit změny magnetického napětí U_m mezi dvěma body v magnetickém poli. Měřicí cívka je speciálně upravená pro integrační měření. Tenký ohebný pásek z nemagnetického nevodivého materiálu s konstantním průřezem je pravidelně ovinutý po celé délce vinutím. Magnetický tok pro takto zhotovenou cívku je úměrný magnetickému napětí U_m mezi konci jejího vinutí.

Při měření tímto potenciometrem musíme brát ohled na to, že má velký počet závitů a tvoří ho tenký drát a tím má zpravidla i velký vnitřní odpor. U měření intenzity magnetického pole H na povrchu otevřeného feromagnetického vzorku se používá úprava, kdy místo výše popsané konstrukce se využívá vinutí na pevném jádře ve tvaru poloviny toroidu. [1][3]



Obr. 1.1) Rogowskiho-Chattockův potenciometr pro měření změny magnetického napětí (U_m) [1]

1.1.3. Rotační a vibrační sondy

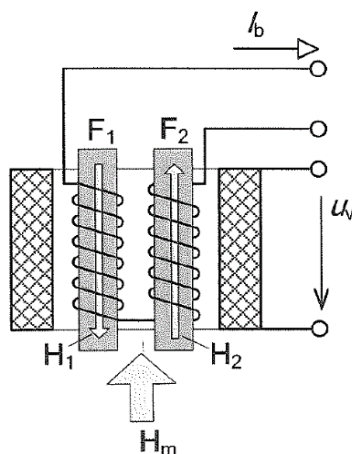
U rotační nebo vibrační sondy je v nepřetržitém pohybu cívka, která periodicky indukuje napětí. Oproti integračnímu měření, které indukuje v měřicí cívce jednorázový impuls napětí, lze u rotační a vibrační sondy indukované napětí bez problému změřit i běžným voltmetrem. Pokud se otáčí cívka úhlovou rychlostí v homogenním magnetickém poli, indukuje se napětí sinusového tvaru.

K výhodám magnetometrů s rotační cívkou můžeme zařadit jejich vynikající dlouhodobou stabilitu. Mezi nevýhody řadíme vysokou spotřebu a nízkou spolehlivost z pohledu údržby, neboť obsahuje pohyblivé díly a kartáče.

Magnetometry s rotační cívkou měří převážně podle způsobu vibrace pole neboli gradient pole. Lineární periodický pohyb cívky se vyvolává několika způsoby. Jeden způsob je třeba pomocí piezoelektrického měniče. Magnetometry s vibrační cívkou se používaly k měření magnetických vlastností materiálů. Dnes je spíš využívána metoda vibrujícího vzorku. [2][5]

1.1.4. Feromagnetická sonda (fluxgate)

U tohoto typu sondy se můžeme setkat v literatuře se dvěma zapojeními z pohledu konstrukčního provedení. Starší zapojení se skládá ze dvou rovnoběžných pásků kvalitního feromagnetického materiálu. Každý z pásků je ovinutý cívkou o stejném množství závitů, které slouží ke snímání. Popsané zapojení se stále v oblasti měření a testování využívá. Další řešení už nemá dvě jádra, ale jádro tvoří oválný toroid. Ten obklopuje navinutá měřicí cívka. Výstup ze sondy závisí na magnetickém poli kolem jádra. Pro obě zapojení platí stejné požadavky na napájení, a to především na budicí proud. Zde se musí jednat o harmonické napájení a s modulovanou dvojnásobnou frekvencí. [1][2][3]

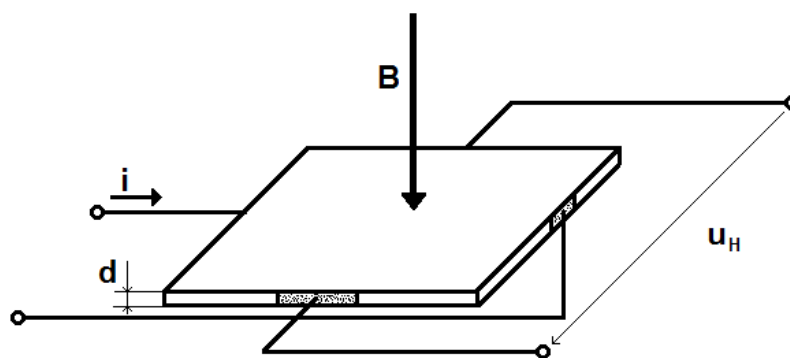


Obr. 1.2) Provedení feromagnetické cívky se dvěma zapojeními jádry[1]

1.1.5. Hallova sonda

Mezi přednostmi této sondy by se daly zařadit dvě věci, a to jsou velikost a materiál sondy. Princip je založený na Hallově jevu, který je typický pro polovodiče. Jelikož sonda neobsahuje feromagnetické materiály a sondou protéká malý napájecí proud, tak ovlivňuje minimálně měřené magnetické pole. Polovodiče mají velkou Hallovu konstantu, náboje se musí pohybovat větší rychlostí, než u ostatních vodičů a působení sil je větší, čímž je i větší výstupní napětí. Měřicí plocha sondy nemusí být nijak

veliká, proto je běžné se u ní setkávat i s malými rozměry sondy. Pro plochu je omezením malá tloušťka destičky ve spojení s křehkostí polovodičových materiálů. To nám dává výhodu dostat se sondou do různých i méně dostupných míst pro měření magnetického pole. Citlivost sondy je ovlivněna jednak použitím polovodičových materiálů, kde nám jde o hodnotu Hallovy konstanty, ale taky o malý odpor materiálu. Mezi problémy sondy můžeme zařadit teplotní závislosti, kdy se musí vřadit jiný polovodičový prvek s opačnou polaritou teplotního koeficientu, než má použitá Hallova sonda pro dosažení teplotní kompenzace sondy. [1][2][5]

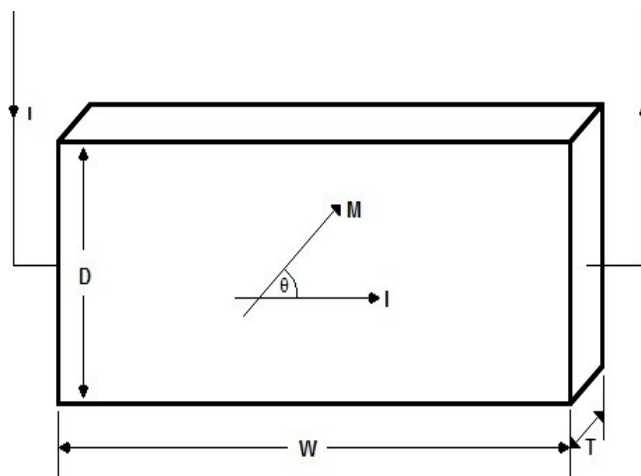


Obr. 1.3) Hallova sonda, konstrukční provedení[3]

1.1.6. Magnetorezistivní převodník

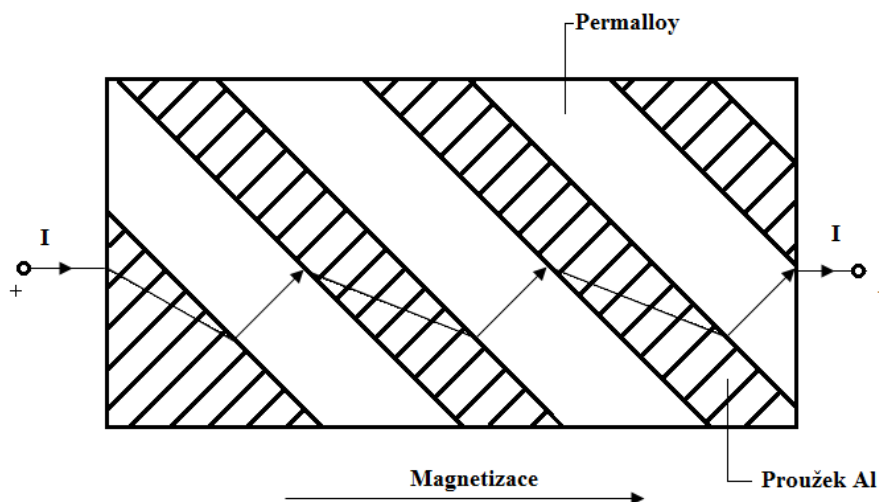
Jeho princip se dá i odhadnout i z názvu, kdy převádí magnetické pole na změnu odporu. Z fyzikálních principů vzniklo pro tento jev několik převodníků, patřících do skupiny magnetoodpory nebo magnetorezistory. Rozebírat dále budeme spíše čidla z feromagnetického materiálu, protože polovodičové magnetoodpory jsou spíše na ústupu.

AMR, neboli anizotropní magnetorezistor, řadíme mezi typy, kde lineární aplikace dosahuje nejlepších parametrů. Zejména u tohoto čidla se využívá anizotropní magnetorezistivní jev. Tenký proužek tvořící magnetorezistor, který je z Permalloye, což je slitina NiFe s vysokým obsahem niklu. Pokud vektor vnitřní magnetizace je rovnoběžný s páskem, tak dosahujeme nejvyššího odporu pásku. Nejnižší odpor pásku by byl, když by vektor magnetizace dosahoval kolmosti (pravého úhlu). Z toho vyplývá, že odpor pásku závisí na úhlu vnitřní magnetizace a pásku. Výstupní charakteristika by ale stejně nebyla úplně lineární, ale spíše by připomínala sudou funkci.



Obr. 1.4) Princip magnetorezistivního převodníku [1]

Z toho důvodu je jednou z možností, jak dosáhnout lepší citlivosti a zároveň největšího přiblížení k lineárnímu průběhu, připevnění hliníkových tenkých pásků šikmo pod úhlem 45° . Hliník má na rozdíl od Permalloye větší vodivost, a proto proud protéká nejkratší dráhou, a to přes hliníkové proužky pod úhlem. Výše popsanému provedení se říká „Barbes poles“.



Obr. 1.5) „Barbes poles“ převodníku AMR [1]

Další způsob je připojení kompenzační cívky, kde její magnetické pole je proti směru vnějšího pole. Cívka představuje zpětnou vazbu. Zde záleží hlavně na linearitě zpětnovazební smyčky a ta není ovlivněna nelinearitou průběhu převodníku. Výhodou oproti hliníkovým plíškům je snížení teplotní závislosti převodníku, ale za cenu větší spotřeby pro napájení cívky. [1][2]

1.1.7. Vláknové a magnetooptické senzory

Využívají techniky optických vláken, kde jejich princip je založený na magnetostrikčním jevu. Pomocí Mach-Zenderového interferometru se měří prodloužení optického vlákna pokrytého napařenou tenkou vrstvou magnetického materiálu. Pro měřicí i referenční ramena jako zdroj světla se používá laserová

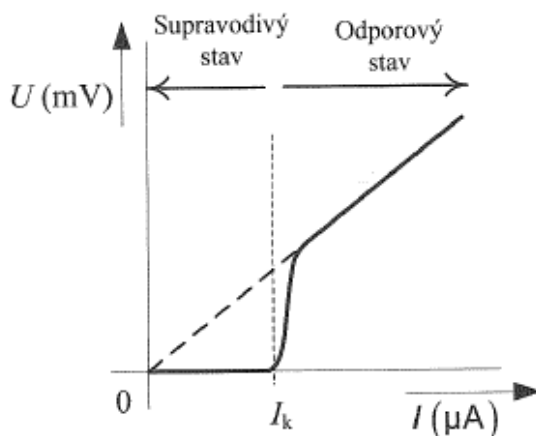
dioda. Senzor je extrémně citlivý na otřesy a teplotní změny. V praxi se tento snímač zase příliš nevyužívá.

Základ magnetooptických čidel vychází z Faradayova jevu. Zmíněný jev má velmi nízkou citlivost, nicméně malou dobu odezvy a detekuje magnetické pole s frekvencí v řádu GHz. Setkat se v praxi s magnetooptickým senzorem v dnešní době můžeme snad už jen v záznamové technice. [2]

1.1.8. SQUID převodník

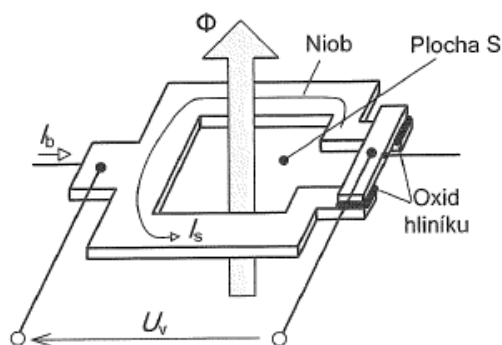
Jev zvaný supravodivost se vyskytuje u některých materiálů při velmi nízkých teplotách, kde měrný odpor se rovná nule. Magnetické pole má vliv na vodivost. Rostoucí magnetickou indukcí roste i teplota, tudíž po překročení kritické hodnoty může supravodivost u určitého materiálu zaniknout. Při dosažení kritické meze se ze supravodivého stává normální, tedy odporový stav.

Superconducting Quantum Interface Device (SQUID) neboli supravodivé kvantové rozhraní toho jevu využívá a díky tomu patří mezi opravdu hodně citlivé snímače. Rozsah měřidla je v oblasti od fT(10^{-15} T) do nT(10^{-9} T). SQUID reaguje na změny magnetického toku. Magnetometr tvoří prstenec ze supravodivého materiálu. Prstenec je přerušen na jednom, nebo více místech, kde propojeným Josephsonovým přechodem. Měřidlo je chlazené tekutým heliem, aby se docílilo supravodivého stavu, který je při velmi nízkých teplot. Střed prstence tvoří plochu (tunel), kterým může pronikat elementární kvanta magnetického toku neboli fluxony (elektrony).



Obr. 1.6) VA charakteristika Josephsonova přechodu[1]

SQUID má dvě varianty pro napájení převodníku, a to stejnosměrné, nebo vysokofrekvenční. Prstenec stejnosměrného magnetometru má vražený dva Josephsonovy přechody, zatímco u s vysokofrekvenčním buzením, kde se využívá kmitočet od 20 do 30 MHz, se aplikuje pouze jeden. Díky vysoké frekvenci se využívá pravidelných přeskoků mezi odporovým a supravodivým stavem. U stejnosměrného buzení jsou přechody napájeny stejnosměrným proudem paralelně. V okamžiku, jak prstencem začne procházet magnetický indukční tok, vyvolá vznik stínícího proudu v prstenci. Stínící proud pak v superpozici se stejnosměrným budícím proudem stará o přepínání mezi odporovým a supravodivým stavem. Přepínání mezi stavy je periodické. [1][2]



Obr. 1.7) Konstrukce stejnosměrného převodníku SQUID[1]

1.2. Měření vlastností feromagnetických materiálů

1.2.1. Měření vlastností feromagnetických materiálu

Základním cílem měření je, abychom z výsledku měření daného materiálu získali požadované veličiny charakterizující měřený materiál. Veličiny charakterizující měřený vzorek by pak měly sloužit k využití při výpočtech magnetických zařízení.

U měřeného vzorku se musí zamezit ovlivnění vzorku vnějším prostředím, nebo samotným měřicím zařízením. V přípravě vzorku se musíme vyvarovat nadměrnému mechanickému zatěžování, aby nedocházelo k opotřebení materiálu. Doporučuje se provést měření u více podobných vzorků, nejlépe stejných parametrů, a z výsledků udělat průměr. Dodržení veškerých patřičných podmínek pro dosažení nejlepšího vzorku vyžaduje velkou zkušenost.

Nejčastěji používané je měření na oddělených vzorcích materiálu. Na tento způsob se vztahuje mnoho běžných metod měření, proto je nejpoužívanější. Nevýhoda je taková, že přímo testovaný materiál už není dále použitelný ve výrobě, tím mohou vznikat různé nepřesnosti. Další možnost je nedestruktivní měření. Zde se testuje materiál jako celek, nebo jen některé části z celku. To nám zajišťuje možnost si vybrat vhodný materiál pro další zpracování. Výhodou tím pádem je, že máme kontrolu nad materiálem nebo jednotlivými kusy použitými ve výrobě. Tento typ měření je většinou spíše porovnávací metodou u jednotlivých vzorků. To může být problém pro náročnější zařízení, kde se vyžadují přísnější požadavky. Většina kusů v praxi splňuje přesnost jen přibližně.

Přesnost měření je též nezanedbatelnou vlastností, jež je potřeba zmínit. Feromagnetické materiály mají svá specifika na rozdíl od běžných měření často využívaných v elektrotechnice. U běžných technických měření feromagnetických materiálů se chápá jako dostatečná přesnost do několika procent, protože mohou být ovlivňovány daleko více parametry než jiná měření. Mezi tyto faktory se dají zařadit: rozdílnost materiálu, nestálost vlastností, hystereze nebo nelineární charakteristika, ze které vzniká závislost výsledku na postupu magnetování. [4][5]

1.2.2. Vzorky materiálu

Pro měkký materiál, jako je třeba permalloy se častěji využívá měření na uzavřeném vzorku. Dá se tak určit intenzita magnetického pole z magnetizačního proudu, na rozdíl od měření na otevřeném vzorku by se musela měřit přímou metodou. U otevřeného vzorku je materiál namáhán vnějšími vlivy, ať mechanickými, tak rušivým vnějším polem. Uzavřený vzorek měkkého materiálu je nejvhodnější kruhového tvaru (toroidu). Ten se pak skládá z jednoho kusu, nebo může být poskládán z plechů tvaru kruhového, nebo navinutých do prstence. Malý počet závitů nebo nerovnoměrné rozložení magnetizačního vinutí po obvodu mohou vést k nehomogenitě pole.

Velmi tvrdé materiály mají problém v uzavřeném prostoru s vytvořením velké intenzity magnetického pole. Lze to krátkými pulzy, ale je potřeba velký proud. Častěji se měří tvrdé materiály na otevřených vzorcích.

Pro materiály, které jsou rozměrné, a nelze v nich použít uzavřené vzorky, se využívají vzorky otevřené. Řezání a následně spojování materiálu, nebo ohýbání, není řešení. Mohlo by to změnit magnetické vlastnosti daného materiálu.

Před měřením by měl být vzorek řádně odmagnetován. Výjimku tvoří magnety velkých impedancí, kde předchozí zmagnetování nemusí mít ani žádný vliv. Používá se střídavý proud ze sítě (síťový kmitočet), kde nejvyšší hodnota odpovídající nejbližší indukci v blízkosti nasycení pozvolna se snižuje až k nule. Pro magneticky měkké materiály začíná intenzitou pole dvacetinásobku koercitivní síly materiálu, přičemž snížení musí trvat alespoň půl minuty. Pro magneticky tvrdé materiály je dvacetinásobek příliš moc. K odmagnetování pro tvrdé materiály stačí intenzita pole dvakrát až třikrát větší, než je koercitivní síla.

Vliv teploty pro většinu feromagnetických látek nehraje při normální teplotě (20 °C) zase takovou roli na magnetickou indukci a permeabilitu. Tolerance je od dvou do pěti stupňů. Najdou se i výjimky teplotně závislých materiálů, kde se musí dbát na definované teploty pro měření. [2][4][5]

1.3. Měření magnetizačních charakteristik na uzavřených vzorcích

Základem uzavřeného vzorku je, že tvoří uzavřený magnetický obvod. Pokud je obvod homogenní a vinutí je rovnoměrně rozloženo, můžeme snadno splnit podmínky správného měření vlastností materiálu. Postup spočívá ve vyloučení rozptylového toku, čímž dosáhneme homogenního pole ve zkoumaném vzorku. Mezi hlavní výhody uzavřených homogenních vzorků řadíme, že intenzitu magnetického pole lze počítat z magnetizačního proudu. Významnou předností je malá citlivost vzorků na vliv vnějších polí. U uzavřených vzorků lze určit intenzitu pole z magnetizačního proudu. Zde je rozdíl v porovnání s otevřenými vzorky, kde se musí většinou měřit přímou metodou.[2]

$$H_z = \frac{N_1 \cdot l_1}{l_s} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (1.2)$$

kde:

N_1 ... počet závitů magnetovacího vinutí

I_1 ... magnetovací proud

l_s ... střední délka siločar

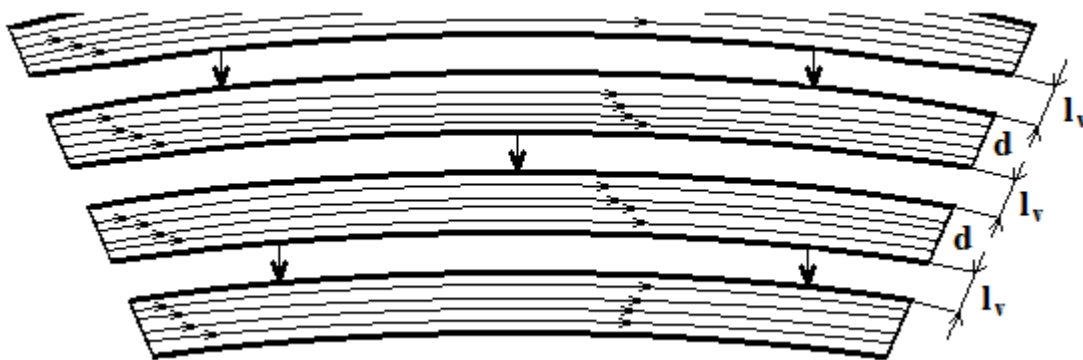
H_Z ... homogenní pole

I. Nehomogenita pole při velkém rozdílu vnějšího a vnitřního pole

Při velkém rozdílu vnitřního a vnějšího průměru vzniká také zkreslení charakteristiky, jež je způsobené různými pracovními body a tím i různou permeabilitou. Obecně se nedoporučuje, hlavně při měření sloužících k určení vlastností materiálu v jednotlivých vrstvách toroidu, poměr $r_2/r_1 > 1,25$. U velmi nelineárních materiálů, jako třeba s pravoúhlou hysterezní smyčkou, se právě zde projeví zkreslení charakteristiky. [2]

II. Vliv vzduchových mezer u toroidů vinutých z pásků

Závity pásku však tvoří spirálu, tedy křivku neuzavřenou. Magnetický tok musí překonávat vzduchovou mezeru mezi jednotlivými závitů a skutečnou hodnotu intenzity v materiálu. Vliv je výrazný jen u vzorků s velkou permeabilitou, velkými vzduchovými mezerami, malým činitelem plnění, malým počtem závitů N a malým průměrem l_s .



Obr. 1.8) Vzduchové mezery vinutých pásků v prstenci [2]

Popsaný efekt nenastává u vzorků skládaných z mezikruží. Z pohledu přípravy dělením materiálu a využití materiálu jsou mnohem výhodnější vinuté vzorky. Složené vzorky se navíc hodí pouze pro izotropní materiály, protože magnetický tok se uzavírá ve všech směrech roviny materiálu. [2]

III. Nehomogenita pole při nerovnoměrném rozložení magnetizačním vinutí

V případě, že má měřený vzorek malou permeabilitu a nerozpíná se magnetický tok, je třeba vinutí rozprostřít rovnoběžně a nejlépe dostatečně hustě. V opačném případě nám rozptylové toky mohou způsobit nehomogenitu pole. Na pokles permeability je třeba brát ohled i u vysokofrekvenčních měření, kde by materiál pracoval v oblasti nasycení. [2]

IV. Parazitní kapacity magnetovacího vinutí

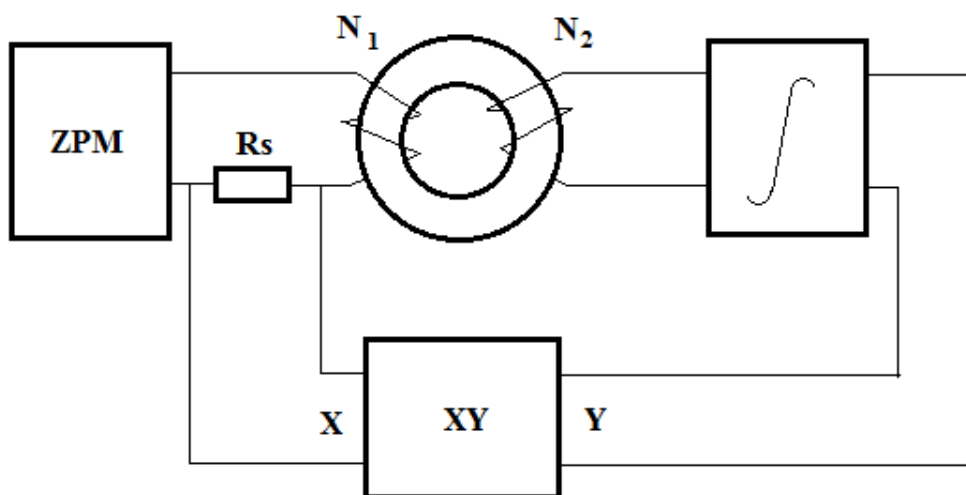
Především u vyšších kmitočtů se mohou často projevit parazitní mezizávitové kapacity vinutí, které s indukčností vinutí vytváří rezonanční obvod. U měření frekvencí v blízkosti f_r vnikají velké chyby. [2]

V. Vliv vnějšího magnetického pole

Feromagnetické materiály složené ze slitin drží poměrně hodně magnetismu i poté, co byly vystaveny vnějšímu magnetickému poli. Některé vzorky mohou být ovlivněny i zemským magnetickým polem, a stejněsměrně zmagnetizovány. [2]

1.3.2. Měření při stejnosměrném magnetování

Všechna stejnosměrná magnetická měření se spojitým magnetováním jdou provést podle zapojení na Obr. 1.9.



Obr. 1.9) Blokové schéma zapojení pro měření spojitým magnetováním [2]

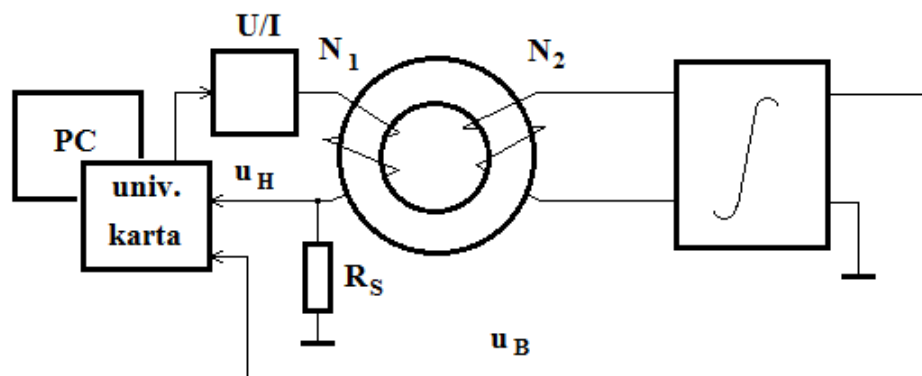
K nejlepšímu splnění podmínek stejnosměrného měření je zapotřebí zdroj magnetovacího proudu (ZMP). V nejjednodušším případě lze použít i ručně řízený zdroj, ale měl by být schopen dostatečně jemné spojitě regulace. Pro tento případ pak dále rozhoduje o správném průběhu měření zkušenost obsluhy. Mezi výhody se řadí možnost záznamu malých hysterezích smyček, nesouměrných smyček a podobně. [2]

1.3.3. Měření při střídavém magnetování

U střídavých magnetických veličin, jako je to třeba u elektrických veličin, jsou měřeny a udávány maximální hodnoty amplitudy, střední hodnoty, efektivní hodnoty, okamžité hodnoty, nebo také dále mohou být udávány harmonické složky nesinusových průběhů.

Dnešním trendem, především díky lepší účinnosti při střídavém magnetování, je využití počítačem řízeného měřicího systému. Vzorkovány synchronně jsou magnetovací proudy a indukované

napětí. Intenzita magnetického pole se určí z magnetizačního proudu a indukce je z indukovaného napětí dopočítána numerickou integrací.



Obr. 1.10) Blokové schéma zapojení pro měření střídavým magnetováním [2]

Magnetovací proud může být generován více metodami. První varianta se nabízí pomocí autonomního zpravidla sinusového generátoru s počítačem nastavitelnou amplitudou a frekvencí. Další variantou je generování programovatelným generátorem, který umožňuje průběh proudu vyladit požadavkům cíleného magnetování. V paměti počítače nashromážděné vzorky okamžitých hodnot aktuálního měření H i B umožňují dynamické vykreslení hysterezní smyčky, určení hodnot významných bodů smyčky, výpočet ztrát z plochy, korekci nenulové hodnoty za jednu dobu periody. Pro měření při vyšších frekvencích je běžně možné usměrňovat amplitudové a fázové chyby jednotlivých částí celého měřicího řetězce.

Podle hardwarových možností jsou měřicí systémy založené na tomto způsobu vyvíjeny a používány na jednotlivých pracovištích podle jejich specifických požadavků. Systémy jsou hardwarově i softwarově různé a nelze je v praxi běžně používat jako univerzální měřicí metodu. Nemusely by být natolik přesné v porovnání s vytvořením metody měření „na míru“. [1][2]

1.4. Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích

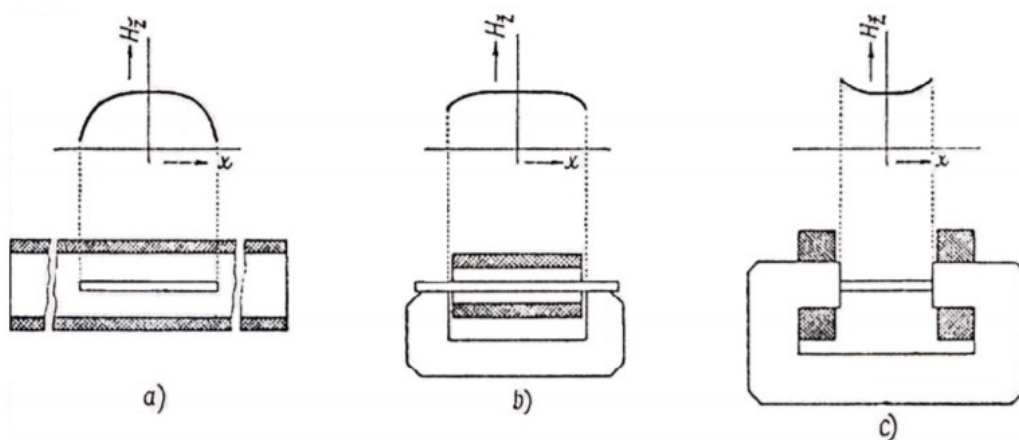
Pro měření na uzavřených vzorcích se především měřicí metody volily pouze podle kmitočtu na měření stejnosměrná a střídavá. Zvolení jiných měřících metod podle ostatních magnetických vlastností nemělo smysl, jelikož uzavřené magneticky tvrdé vzorky nemají fyzikální význam. To však neplatí pro vzorky s otevřenými, kde je tomu jinak. Základem je rozdělení měřících metod ze strany pohledu magnetických vlastností. Zde se liší měření, magneticky tvrdých materiálů a magneticky měkkých materiálů. U magneticky tvrdých materiálů přicházejí v úvahu pouze měření stejnosměrná, ovšem u otevřených vzorků materiálů magneticky měkkých máme už více možností, zde měřicí metody dělíme na stejnosměrné a střídavé.

Správné měření vlastností materiálu je z mnoha důvodů u otevřených vzorků obtížnější než u uzavřených vzorků. Chyby vznikají především nerovnoměrným rozložením intenzity magnetického pole podél celého měřeného vzorku. Tomu samozřejmě lze při měření předejít tím, že se u měření

zaměříme pouze na malou část vzorku, kde je intenzita pole odhadem co nejvíce konstantní, nebo kompenzací magnetického napětí na reluktancích vzduchových mezer. [2]

1.4.1. Magnetování otevřených vzorků

Při magnetování vzduchovou cívkou (a) se největší intenzita nachází uprostřed vzorku. Rovnoměrného magnetování bychom dosáhli, pokud bychom provedli úpravu vzorku do tvaru rotačního elipsoidu. Tento princip magnetování se využívá hlavně v koercimetrech. Pokud by byla magnetovací cívka při magnetování ve jhu umístěna jako na vzorku (b), klesá intenzita směrem k dolní části (až ke konci) vzorku. Jestliže jsou cívky umístěny na nástavcích jha (c), je naopak intenzita oproti (b) na koncích vzorku největší. Využití obou předností vzorku (b) a (c), můžeme vykombinovat způsoby magnetování ve jhu. Ve výsledku by se přibližně mohlo dosáhnout homogenního pole vzorku.[2]



Obr. 1.11) Magnetování otevřených vzorků[2]

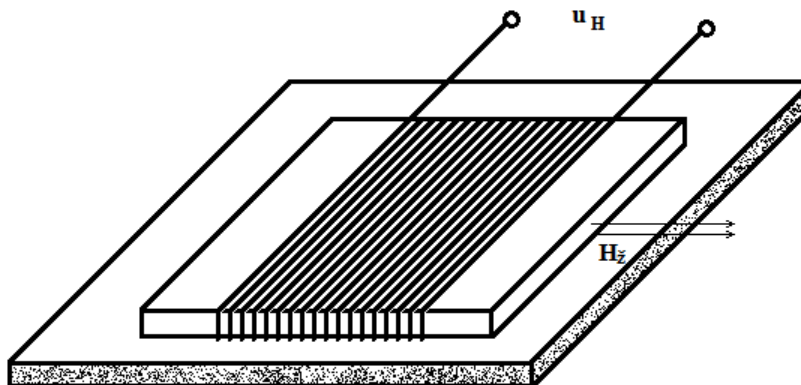
1.4.2. Určení intenzity při měření otevřených vzorků

Pokud nebereme v potaz určité výjimky (kompenzované permeametry) nejde u otevřených vzorků určit s dostatečnou přesností intenzitu magnetického pole z magnetovacího proudu. Pouze odhadem jde určit intenzitu z magnetovacího proudu při magnetování ve jhu dle Obr. 1.11 b). Pokud je reluktance jha a vzduchových mezer mezi vzorkem a jhem vůči reluktanci vzorku minimální, pak je možné počítat intenzitu stejně jako u uzavřeného vzorku. Pak by mělo platit, že délka siločáry by měla odpovídat délce vzorku. Danou metodu nejde samozřejmě uplatnit pro vzorky magneticky měkkých materiálů s velkou permeabilitou. Tam jsou přídatné reluktance nezanedbatelné. U magneticky tvrdých materiálů nejde nasunutou cívkou na vzorku docílit dostatečného zmagnetování. Jde ale zase pouhým odhadem určit intenzitu ve feromagnetickém vzorku při magnetování ve vzduchové cívce (Obr. 1.11).

Při měření tečné složky intenzity je využívána teorie, že tečná složka intenzity na rozhraní se mění spojitě. To znamená, že měřením tečné složky intenzity těsně na povrchu vzorku určíme intenzitu magnetického pole ve vzorku. Pro měření lze využít všechny dostupné metody měření intenzity magnetického pole ve vzduchu, které však splňují podmínku bezkontaktního měření povrchu vzorku. Za těchto okolností neovlivňují měřený vzorek a zároveň nevadí přítomnost vnějšího feromagnetika. Na základě zmíněného je aktuálně nejčastěji užívána Hallova sonda, popřípadě taky plochá cívka a

Rogowskiho-Chattockův potenciometr (RCP). Hallova sonda měří lokální hodnotu intenzity. Zvládá využít více metod, a to jak stejnosměrnou, tak s časově proměnným magnetickým polem.

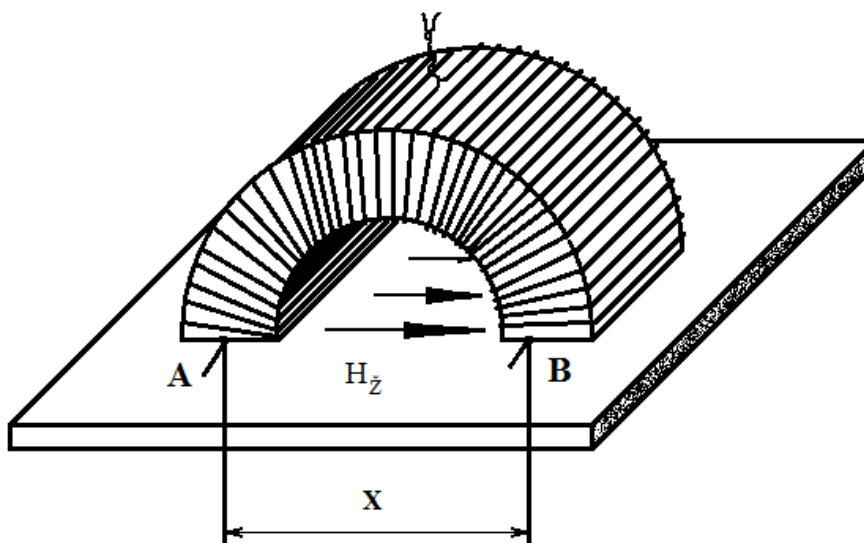
Plochá cívka měří v perimetru své délky průměrnou hodnotu tečné složky intenzity H_z . Dá se využít v místech, kde je alespoň v oblasti cívky zajištěno homogenní pole. [2][5]



Obr. 1.12) Plochá cívka [2]

Ve vinutí ploché cívky se indukuje napětí u_H , jenž je dané změnou toku spojeného s cívkou. Pro u_H platí, že je střední hodnotou napětí indukovaného v ploché cívce.

Další možností pro měření H_z je využití Rogowskiho-Chattockového potenciometru. Pro tento způsob měření je hlavně používán pevný RCP ve tvaru části kruhu.[2]



Obr. 1.13) RCP ve tvaru části kruhu[2]

1.4.3. Měření magnetizačních charakteristik magneticky tvrdých materiálů

U magneticky tvrdých materiálů (MTM) se zpravidla určují následující parametry: koercivita H_c (A/m) na křivce $B = f(H)$, koercivita H_{CJ} (A/m) na křivce $J = f(H)$, remanence B_r (T) (jedná se o tutéž věc jako remanence J_r , toto označení se dnes už však spíše neužívá a lze se s tím setkat ve starších dokumentacích), měrná energie BH (J/m³). Občas se ve 2. kvadrantu hysterezní smyčky proměřují malé

hysterezní smyčky. Informace z těchto malých hysterezních křivek jsou velmi důležité pro návrh obvodů s permanentními magnety. Všechny výše vypsane parametry musí být měřeny na maximální hysterezní smyčce. Při měření tedy musí být dosaženo nasycení materiálu, které je velmi důležité pro získání maximálních hodnot. U magneticky tvrdých materiálů se dá odhadovat, že poměr pro dostatečné zmagnetování nastává asi při $H > 5 \cdot H_c$. Toho poměru při koercivitách současných magneticky tvrdých materiálů dosáhnout pouze v magnetovacím jhu s uspořádáním jako to je zobrazeno na Obr. 1.11 c). Materiály obohacené kovy vzácných zemin ve skutečnosti nejdou jednoduše nasytit ani ve jhu a je potřeba je impulsně magnetovat ve vzduchové cívice nebo v supravodivém solenoidu.

Běžné tvary vzorků magneticky tvrdých materiálů, se kterými se jde setkat, jsou obráběny do tvaru hranolku nebo válce s malým poměrem l/d . Tento malý poměr má pár nevýhod jako třeba, že vyvolává velký demagnetizační činitel ($D = 0,1$ až $0,2$). Avšak malá permeabilita magneticky tvrdých materiálů způsobuje velmi malou demagnetizaci. Pokud ale plochy pólových nástavců jha jsou podstatně větší než průřez vzorku, lze dosáhnout u vzorku a v jeho okolí natolik homogenního pole, že nám umožní pro běžné provozní měření intenzity použít cívky s větším průřezem, které nesplňují podmínku měření bezkontaktně u povrchu vzorku.

Při laboratorních měřeních vedených k získání vlastností magneticky tvrdých materiálů je indukce měřena pouze integračně pomocí měřicí cívky navinuté těsně na vzorek, nebo také cívkou navinutou na tuhém materiálu tvořícím kostru, nasunutou na vzorek. Díky malé permeability magneticky tvrdých materiálů tok vzduchem není nikdy zanedbatelný pro neideálně umístěnou měřicí cívku. I při navinuté cívice těsně kolem vzorku musíme počítat s průměrem vodiče, pokud tedy není vůči průměru vzorku zanedbatelný.

Jestliže dokážeme měřený vzorek ve jhu nasytit, měříme celou hysterezní smyčku a hodnoty $\pm B_m$ ($\pm J_m$) určíme s využitím její symetrie při maximálním vykreslení. Pro naměření indukce může být použito více variant. Jedná se o varianty jako využití násuvné cívky, cívky vinuté na vzorek nebo pomocí pólového nástavce.[2]

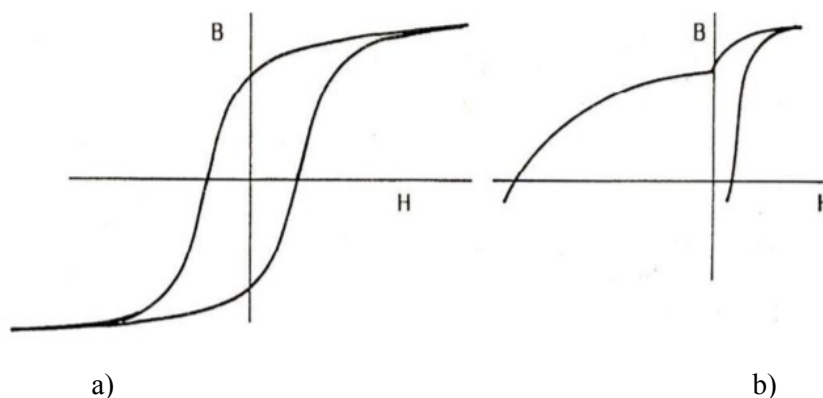
1.4.4. Záznam charakteristiky MTM se změnou měřítka intenzity v 1.

Při návrhu základního obvodu s permanentním magnetem je hlavně důležitá jeho charakteristika hysterezní smyčky. Při využívání permanentního magnetu je pro nás podstatný 2. kvadrant, kde leží jeho pracovní bod. Z celé hraniční hysterezní smyčky zabírá 2. kvadrant v měřítku intenzity pouze asi 10 % (Obr. 1.14 a)) charakteristiky. Často výsledná charakteristika materiálu je vykreslována pouze v prvních dvou kvadrantech. Měřítka intenzity je pozměněno v 1. kvadrantu oproti 2. kvadrantu v poměru 1:5 až 1:10 (Obr. 1.14 b)).

V tomto případě získané hodnoty 1. kvadrantu velmi často slouží pouze ke kontrole, jestli bylo při magnetování dosaženo nasycení vzorku. Pokud je dosažené nasycení, je charakteristika $B = f(H)$ rovnoběžná s přímkou H a charakteristika $J = f(H)$, tudíž je rovnoběžná s osou intenzity.

Při měření magneticky tvrdých materiálů jsou v současnosti už velmi často čistě analogové měřicí obvody nahrazovány měřicími systémy s využitím PC. Podobně jako u uzavřených vzorků se tím snaží vyprostit chyb při měření vzniklé lidským faktorem. Časová konstanta magnetovacího jha určuje dynamiku magnetovacího procesu. Ta je hlavně u velkých elektromagnetů velmi dlouhá, kdy dosahuje řádově jednotek až desítek sekund. Aby při automatických měřeních časová konstanta jha nezpůsobila nežádoucí nárůst intenzity i po zastavení změn magnetovacího zdroje, musí být nárůst intenzity před

dosažením požadované hodnoty dostatečně zpomalen. Důležité je to hlavně při vykreslování malých hysterezních smyček, které vycházejí z definovaných bodů hraniční hysterezní smyčky.[2]



Obr. 1.14) Charakteristika a) bez změny a b) se změnou měřítka[2]

1.4.5. Stejnoseměrná měření otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů

Permeametry je označení pro přístroje, které se používají k měření stejnosměrných magnetizačních charakteristik otevřených vzorků. Postupným vývojem z historického hlediska vznikla celá řada permeametrů a dnes je známe jako: kompenzační permeametry (Ilioviciho, Burrowsův) a kompenzační permeametry bez integračního měření (Brožův, Trnkův), nekompenzovaných (Hopkinsonův, Fahyho) a nekompenzovaných bez integračního měření (Kópselův). Poslední jmenované nemají v současnosti už podstatný význam.

Masívní otevřené vzorky magneticky měkkých materiálů nejsou pro měření v praxi běžné. Jsou spojeny s určitými komplikacemi. Masívní magneticky měkké materiály jsou používány zřídka jen ve velmi zvláštních případech. Mezi tyto výjimky můžeme zařadit pólové nástavce obvodů s permanentními magnety, stínící kryty pro stejnosměrné magnetické pole, magnetické obvody elektromagnetů.

Pokud by se uplatnil postup podobně jako při měření magneticky tvrdých materiálů a upevnil by se měřený vzorek do jha, jsou díky vysoké permeabilitě měřeného vzorku rozptylové toky nezanedbatelné a pole vzorku je tím pádem nehomogenní. Při měření se musí dodržet pravidla pro měření tečné složky H těsně při povrchu a v co největší blízkosti cívky pro měření B . Měříme tak jen aktuální vlastnosti nehomogenně magnetovaného vzorku. Při uplatnění více měřících zařízení na různých úsecích, získáváme tak s velkou pravděpodobností různé výsledky měření. Problémy mohou přijít, pokud potřebujeme změřit malé intenzity polí. Dostatečné homogenní magnetování jde u otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů docílit jedním způsobem, a to kompenzací úbytků magnetických napětí na vzduchových mezerách.[2]

2. Zobrazení hysterezní smyčky a její digitalizace

2.1. Magnetizační charakteristiky

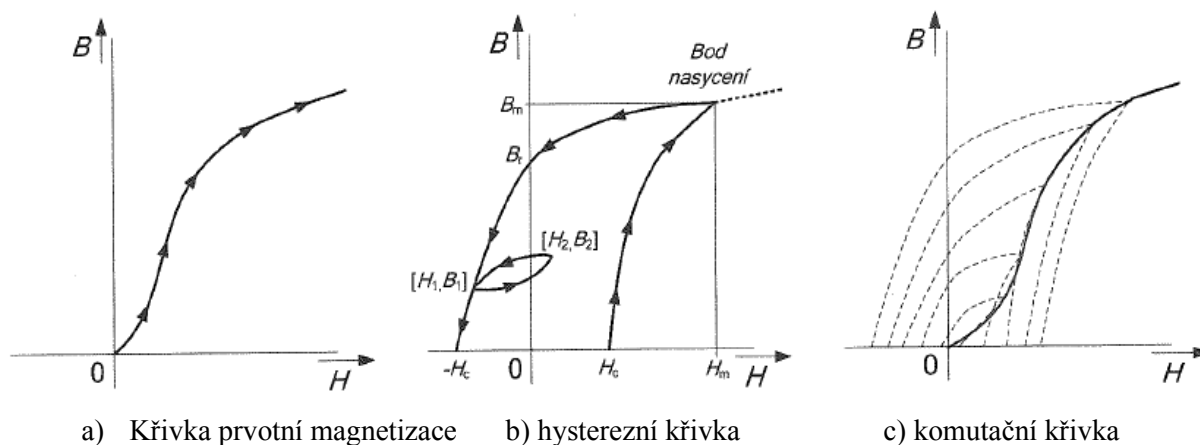
Magnetizační charakteristika představuje grafické znázornění závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H . Magnetizační charakteristika vykazuje hysterezi, a taky není lineární. Stacionární magnetování by přišlo v úvahu tehdy, když by se magnetická indukce a intenzita magnetického pole měnil v měřeném vzorku velmi pomalu. Přestanou se uplatňovat vlivy vířivých proudů a dalších faktorů, které mají dopad na zpomalení magnetování. To minimalizuje jejich vliv na tvar měřené charakteristiky $B=f(H)$. Pro tento případ nám dávají tvar charakteristiky hlavně magnetické vlastnosti materiálu. Také platí, čím je vyšší kmitočet magnetování, tím nastanou rychlejší změny magnetovacího proudu a dochází tak k deformaci hysterezní křivky díky vířivým proudům.[1]

2.1.1. Křivka prvotní magnetizace

Křivka prvotní magnetizace, někdy se setkáváme s označením jako „panenská křivka“, vyjadřuje závislost $B=f(H)$ pokud je splněno dokonalé odmagnetování. Tím nám intenzita pole H pomalu roste. Pro postupné zvyšování magnetizace jedním směrem. Pokud by to tak nebylo, může nastat změna intenzity magnetického pole opačného směru. To by nám vytvořilo jinou magnetizační charakteristiku.[1]

2.1.2. Hysterezní křivka

Jedná se o vykreslení závislosti $B=f(H)$ pro magnetizační cykly, pro změny intenzity magnetického pole H od kladných do záporných hodnot a zpět.



Obr. 2.1) Magnetizační charakteristiky feromagnetického materiálu [1]

Hysterezní křivka má dvě větve: jednu vzestupnou a druhou sestupnou. Její průsečík s osou magnetické indukce značí hodnotu remanentní indukce B_r a průsečík s osou intenzity magnetického pole vyznačuje hodnotu H_c . U intenzity magnetického pole H_m docílíme magnetické indukce nasycení B_m ,

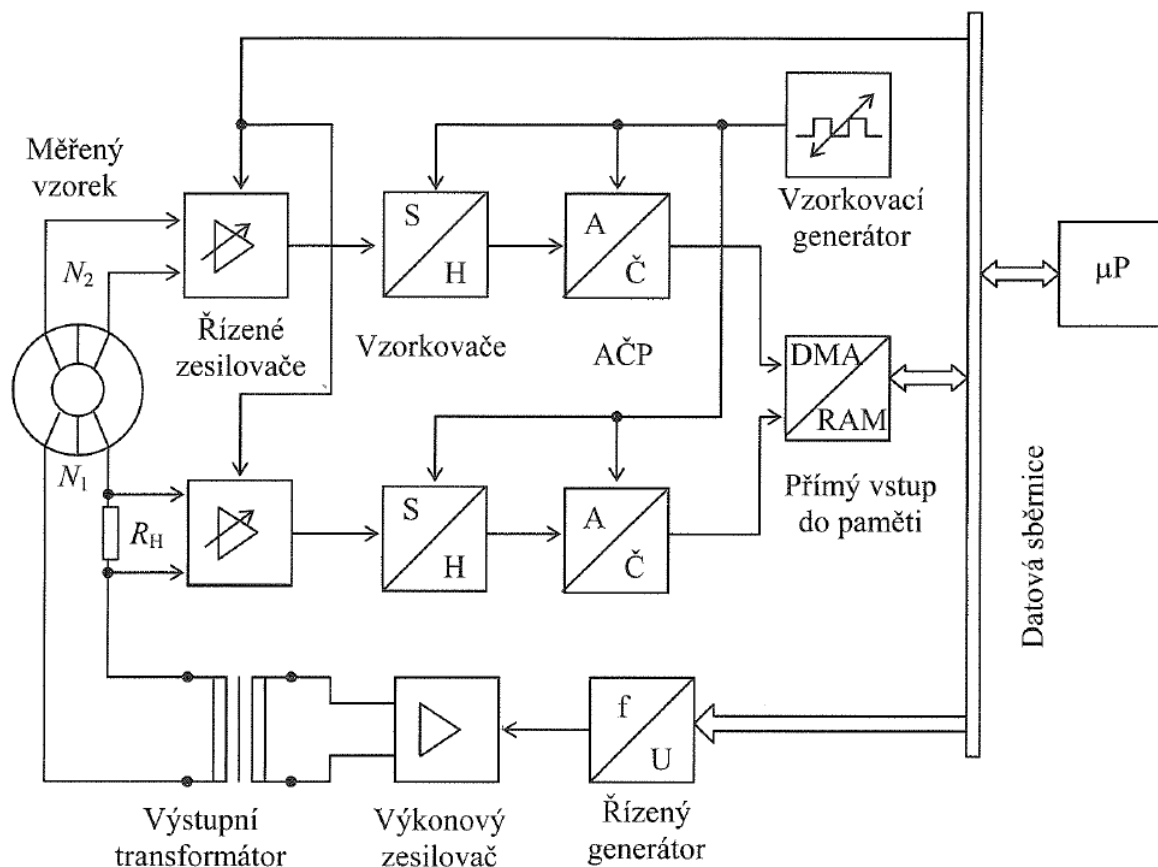
označujeme to jako bod nasycení. Pokud se při dalších zvyšování nemění hodnoty B_r a H_c , označujeme ji jako hraniční hysterezní křivku.

Inkrementální hysterezní křivka může vzniknout u většiny feromagnetických materiálů, kde neodpovídá změna původní magnetické indukce původní křivce, když by se v kterémkoliv bodě změnilo znaménko. Pro příklad v bodě $[H_1, B_1]$ jak můžeme vidět výše v grafu hysterezní křivky.

Pokud by se intenzita magnetického pole zmenšovala pod hodnotu H_m , při každém přemagnetování by došlo ke zmenšení hysterezní křivky a jednotlivé vrcholy by ležely na komutační křivce. [1]

2.2. Digitalizace měření magnetizačních charakteristik

Současné přístroje jsou už běžně řízeny počítačem a jejich proces během měření magnetizačních charakteristik (hysterezigraf) je automatizovaný s digitálním vyhodnocením výsledků měření.



Obr. 2.2) Blokové schéma hysterezigrafu[1]

Měřený toroidní vzorek je magnetován magnetovacím vinutím N_1 napájeným z výstupu transformátoru. Transformátor je spojený s výkonovým budícím zesilovačem. Amplituda a kmitočet magnetovacího proudu jsou řízeny počítačem. Napětí na referenčním odporu R_H je úměrné intenzitě magnetického pole a indukované napětí v měřicím vinutí N_2 toroidu. Vinutí N_2 toroidu zesiluje dvojice

řízených zesilovačů. Tyto zesilovače jsou podle potřeby zesílení řízeny počítačem. Obě zesílené napětí jsou synchronně vzorkována vzorkovacími obvody přímého vstupu DMA/RAM do paměti počítače.

Z dat získaných během několika, nebo i jedné periody, počítač dokáže zpracovat průběh magnetické indukce numerickou integrací napětí z měřicí cívky N_2 . Zároveň nejen s tímto procesem jsou dále i počítány hysterezní ztráty P_h , koercivita H_c , remanentní indukce B_r . K tomu je zobrazena dále i hysterezní křivka z naměřených dat. Číslicovým zpracováním je zajištěna vyšší přesnost ve srovnání s některými běžnými analogovými přístroji. Počítač na základě získaných dat zvolí nejvýhodnější měřicí rozsahy vstupních zesilovačů a provádí automatické korekce offsetu pro lepší vizualizaci.[1]

2.3. Měření dalších parametrů

2.3.1. Měření koercivity H_c

V praxi se běžně požaduje u měřeného vzorku získání koercivity H_c materiálů, používaných pro různé části přístrojů, jako třeba pro magnetické obvody s relé. Přímé změření hodnoty koercivity, bez toho abychom museli změřit celou hysterezní křivku, lze v praxi lze naměřit s přístroji nazývané jako koercimetry.

Vzorek je do nasycení zmagnetován ve vzduchové cívce. Po vypnutí magnetovacího proudu je vycentrován vzorek tak, aby kolmo umístěné feromagnetické sondy zaznamenaly co nejvíce kolmé složky rozptylového pole vzorku. Sondy jsou umístěny pod pravým úhlem k ose solenoidu, protože toto je jediná poloha, kdy nereagují i na jeho vlastní magnetické pole. Po komutaci je proud v cívce opět postupně zvyšován do doby, než pole vzorku zanikne. Vzorek se pak chová jako nemagnetické těleso.

Jiné problémy mohou vzniknout s měřením koercivity magneticky velmi tvrdých materiálů. Pokud se u měřeného vzorku nezajistí dostatečné nasycení ve vzduchové cívce koercimetru, může být vzorek zmagnetován ve jhu a další postup měření je stejný jako u měření magneticky měkkých materiálů. Existují materiály s koercivitou řádově MA/m, které však nelze ani ve vzduchové cívce odmagnetovat. Pro tento případ lze určit H_c z charakteristiky, nebo třeba také metodou umožňující odmagnetování ve jhu. [2]

2.3.2. Měření magnetostrikce

Při měření délkové (nebo objemové) magnetostrikce je možno přímo měřit změnu délky (nebo objemu) vzorku při působení magnetického pole, nebo využít některých nepřímých metod. Přímé metody měření objemové magnetostrikce používají např. hydrostatického převodu: vzorek je umístěn v nádobce naplněné kapalinou až do hrdla tvořeného tenkou kapilárou. I nepatrné změny objemu vzorku pak vedou k pozorovatelné změně hladiny kapaliny v kapiláře. Častěji se měří délková magnetostrikce. K měření délkového prodloužení se používá např. tenzometrů nalepených přímo na vzorek, důmyslných mechanických nebo hydraulických převodů ke zvětšení výchylky nebo nověji různých optoelektronických metod. Společnou nevýhodou přímých metod měření magnetostrikce je velká citlivost aparatury na teplotní změny.[2]

2.3.3. Měření Curieovy teploty

Z obecné fyzikální definice (feromagnetické) Curieova teplota T_c je teplota, při které dochází u materiálu k přechodu z feromagnetického do paramagnetického stavu. Spontánní magnetická polarizace J_s , uvnitř domén v nulovém vnějším poli, právě dosáhne nulové hodnoty. Problémy, které mohou vzniknout u měření T_c jsou třeba, že popsaný přechod nenastává často v celém objemu vzorku, ale zároveň za stejné teploty a hodnoty J_s nelze běžně získat přímým měřením. V běžné technické praxi se T_c určuje na průběhu teplotní závislosti susceptibility.

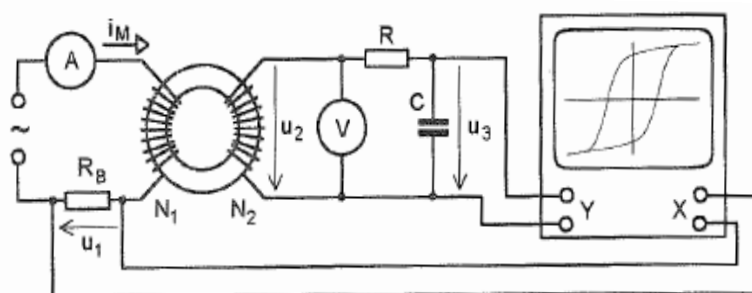
Mezi základní principy, jak snadno určit T_c , se vychází z měření teplotní závislosti susceptibility. Buď se k tomu může využívat některá ze silových metod, kde řadíme magnetické váhy a torzní magnetometr, nebo přesnější indukční metodou, kde se uplatňuje komparační měření indukčnosti cívky s měřeným vzorkem.[2]

2.3.4. Měření anizotropie

Pro měření anizotropie všech druhů magnetických materiálů je asi v praxi nejběžnější torzní magnetometr. Přístroj pracuje na principu, kdy měří torzní (otočnou) sílu ovlivňující měřený vzorek, zavěšený na vlákně v magnetickém poli, a snaží se nasměrovat osu magnetizace vzorku do směru působícího magnetického pole. [2]

2.4. Měření dynamické hysterezní křivky

Ztráty vzniklé vlivem vířivých proudů indukovaných ve feromagnetiku jsou důsledkem toho, že hysterezní smyčka feromagnetického materiálu magnetovaného střídavým proudem se liší od statické hysterezní smyčky a při změnách (navyšování) kmitočtu se dále rozšiřuje. Vlivem povrchového jevu dochází zároveň k fázovému posuvu základní magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H , tudíž se vrcholy hysterezní smyčky zakulacují. Jednoduchý způsob, jak změřit dynamickou hysterezní křivku, je využitím pomoci osciloskopu.



Obr. 2.3) Měření dynamické hysterezní křivky na prstencovém vzorku[3]

Obrázek demonstruje zapojení pro měření hysterezní křivky (Obr. 2.3), kde je napětí přivedené na vstup X osciloskopu úměrné magnetovacímu proudu. Napětí indukované na měřícím vinutí je přes integrační RC článek přivedeno na vstup Y. Napětí u_1 na rezistoru R_B je úměrné velikosti magnetovacího

proudu i_M a zároveň i intenzitě magnetického pole H . Napětí u_1 je přivedeno na horizontální vstup X osciloskopu. Z výstupu sekundárního vinutí se indukuje napětí u_2 , které se integruje např. pasivním RC členem. Z výstupu pasivního integrátoru získáme napětí u_3 a to je přivedeno na vertikální vstup Y osciloskopu. Po přivedení obou napětí na vstupy, vykreslí se na obrazovce tzv. dynamická hysterezní křivka. Pro hysterezní křivku u otevřeného vzorku, by bylo nutné intenzitu magnetického pole H měřit jako tečnou složku intenzity pole na povrchu vzorku. Pak by bylo možné taky vykreslení křivky.[1][3]

2.5. Komunikace s měřicími přístroji ve vývojovém prostředí

2.5.1. Výhody vývojového prostředí pro komunikaci s měřicími přístroji

Každý proces měření s využitím měřicího přístroje má společné typické rozdělení do dvou fází interakce uživatele. Jedná se o tyto dvě fáze procesu měření:

- Konfiguraci měřicího přístroje
- Vyčítání naměřených dat.

Při konfiguraci měřicího přístroje dochází k nastavení parametrů měřicího přístroje podle měřené úlohy. Informace v této fázi měření směřují od uživatele k přístroji. Konkrétněji se to děje na čelním panelu přístroje pomocí tlačítek nebo přepínačů. Jedná se o ovládací prvky.

Druhá fáze procesu měření je charakterizována tokem informací od měřicího přístroje k uživateli. Jedná se o vyčítání hodnot z měřicího přístroje. Na čelním panelu jsou tyto naměřené hodnoty zobrazovány pomocí indikačních prvků (analogová stupnice, textové pole, číselné nebo grafické displeje).

U obou fází interakce mezi uživatelem a měřícím přístrojem je snaha o náhradu koncového uživatele počítačem. Přináší to mnoho i zásadních výhod:

- Automatizace a zrychlení daného měření. Nejen u složitějších procesů umí počítač rychleji vyhodnocovat toky dat a dochází k rychlejšímu vyčítání hodnot.
- Potlačení lidského faktoru a zamezení některých možných chyb vzniklých při měření.
- Díky přenesení dat do počítače, nám to vytváří možnost dalších operací s naměřenými daty.
- Další výhodou je rychlejší prezentace výsledků měření v libovolné podobě.
- Rychlé ukládání naměřených hodnot, nebo zálohování naměřených hodnot získaných z měření.[10]

2.5.2. Komunikační rozhraní na straně měřících přístrojů

I. RS - 232

Jedná se o jednoduchý koncept sériové komunikace. Funguje to tak, že v daném okamžiku prochází přes rozhraní jen jediný bit posílaného bytu. Takhle postupně projdou všechny bity jednotlivého byte. Jde o určité časové rozložení, kdy jsou bity jednoho bytu doplněny pomocnými bity pro management

asynchronního přenosu. Mezi výhody rozhraní spadá jednoduchá kabeláž, kdy komunikace může probíhat v obou směrech současně na velké vzdálenosti.

Nevýhodou je především jeho poměrně malá propustnost (dnes typicky 115 kbitů/s). Další problém je, že je zde omezen jen na komunikaci mezi dvěma koncovými zařízeními. V dnešní době už modernější počítače přestávají toto rozhraní mít a je nahrazováno rozhraním USB.

II. ETHERNET

Ethernet se využívá k vzájemnému propojení (lokální) sítě. Přenosová rychlost rozhraní stále roste a rozhraní se stalo součástí skoro všech počítačů. Díky tomu se začalo uplatňovat toto rozhraní i na měřicí přístroje.

Mezi nevýhody se řadí vysoká náročnost na zatížení procesoru a složitější komunikace. Stále ještě není u měřicích přístrojů natolik rozšířený, jelikož ne tolik výrobců ho na své přístroje aplikuje.

III. USB

Jde o velmi levnou a hodně rozšířenou alternativu rozhraní. Přes dané komunikační rozhraní lze posílat zprávy jak binární, tak textové. Mezi výhody USB patří, že můžeme k jednomu rozhraní připojit více přístrojů. Připojení se může uskutečnit bez problému za provozu. Po připojení automaticky USB detekuje připojený přístroj. V dnešní době není problém pomocí vhodných konvertorů využít rozhraní USB pro propojení RS-232 nebo GPIB. [10]

2.6. SW podpora komunikace s měřicími přístroji

2.6.1. Standardizace komunikace s přístrojem podle normy IEEE 488

Vlivem standardizace komunikace s měřicími přístroji norma IEEE 488 od svého vzniku prošla řadou zpřesňování a rozšiřování. První verzi standardu byla IEEE 488.1, která obsahovala pouze definice mechanických a elektrických požadavků na protokol. Následná verze IEEE 488.2 už předepisovala 15 sekvencí, které musí mít přístroj jednotně implementovány a čtyři volitelné sekvence. Norma předepisuje i protokoly tvořené sekvencemi pro řešení standardních situací. Tyto protokoly šetří čas vývojáře, a dále mu usnadňují tvorbu SW aplikace.[10]

2.6.2. Standardizace komunikace s přístrojem podle VISA

Virtual Instrument Software Architecture (VISA) je další úroveň standardizace. Daná standardizace vznikla z důvodu, že když použil koncový uživatel přístroj s jiným typem rozhraní, vedlo to k nutnosti změnit celou aplikaci v místech použití těchto funkcí.

Ve vývojových prostředích vznikla podle tohoto standardu knihovna funkcí VISA. Funkce jsou schopny realizovat předepsané výměny zpráv bez ohledu na fyzické rozhraní, přes které k ní bude docházet. Pro operace zápisu a čtení v rámci komunikace s přístrojem existují společné funkce VISA_Read a VISA_Write. Knihovna funkcí podporuje komunikaci přes tato rozhraní:[10]

- RS-232
- GPIB
- VXI
- PXI
- Ethernet
- USB

2.6.3. Přístrojové ovladače

Vznik knihoven VISA nebyl pro urychlení tvorby SW aplikací s komunikací s přístroji konečnou fází. Nabízí se možnost doplnění knihoven vývojového prostředí specifickou knihovnou funkcí vytvořenou už specialisty pro daný přístroj – přístrojovým ovladačem.

Přístrojové ovladače mají za cíl zajistit koncovým uživatelům snadný přístup ke všem funkcím přístroje. Funkce přístroje jsou podporovány pomocí komunikačních rozhraní. Je v dnešní době běžné, že přístrojové ovladače jsou k dispozici ke spoustě měřicích přístrojů různých výrobců. Většinou ale ovladače nejsou standardní součástí základu vývojového prostředí a musí se pro daný přístroj do vývojového prostředí doinstalovat. Přístrojové ovladače jsou dostupné jako freeware na portálu www.ni.com/idnet. Jedná se o hotové a ověřené přístrojové ovladače.

Instrument Driver Network (IDNet)

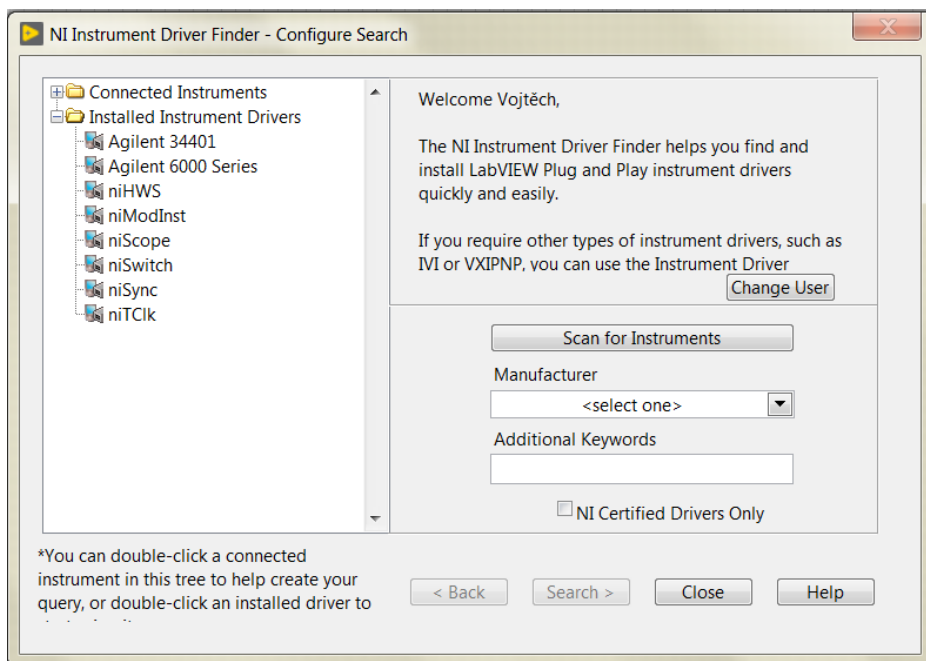
Find, download, or submit a driver to communicate with third-party instruments. If you are looking for drivers for NI products, visit [NI Drivers](#).

The screenshot shows the NI IDNet website interface. At the top, there is a search bar with the text "Ovladače nástrojů" and a dropdown arrow, followed by a text input field labeled "Enter keywords" and a search button with a magnifying glass icon. Below the search bar, there are two main sections. The left section is titled "Popular Drivers" and lists several instrument series: Tektronix TDS 200 1000 2000 Series, Agilent 34970A, Agilent 34401, Keithley 2400 Series, Agilent 33XXX Series, Agilent E363XA Series, Tektronix TDS 3000 series, Tektronix MDO MSO DPO 2000 3000 4000 Series, Ocean Optics 2000 4000 Series, and Agilent MXA Series. The right section is titled "Submit a Driver" and contains links for "Instrument Driver Certification" and "Share your Driver".

Obr. 2.4) Internetová stránka pro výběr ovladače

Pro volné stahování z jejich stránek je potřeba personálního profilu. Přináší to plno výhod, kdy pro začátečníka je k dispozici i plno návodů a dalších výukových materiálů. Při tomto způsobu stahování souborů je potřeba soubory správně uložit. Uložit je potřeba přesně do správného podadresáře, který je k tomu určený. Tudíž po stažení implementujeme do C:/Program Files/National Instruments/LabVIEW 8.2/inst.lib. Po implementaci by měla být paletová nabídka rozšířena o daný ovladač. [10]

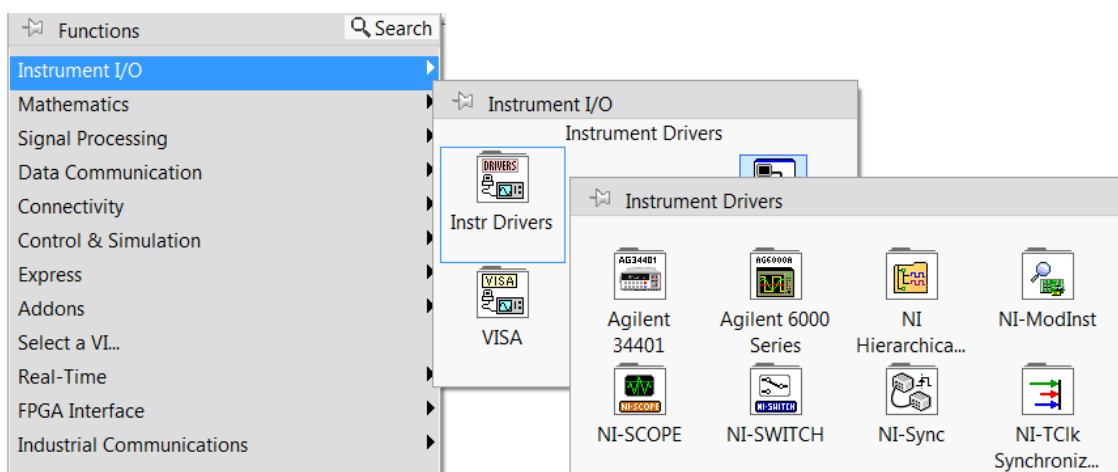
Další možností doplnění ovladačů je přímo přes LabVIEW, kdy v horní liště vybereme Tools -> Instrumentation -> Find Instrument Drivers...



Obr. 2.5) Okno v LabVIEW pro vyhledávání a stahování ovladačů

Zde jsou vidět už stažené ovladače, každopádně podle potřeby můžeme stáhnout další. Vybereme v Manufacturer výrobce měřicího přístroje a do Additional Keywords napíšeme přesný typ přístroje. Po kliknutí na Search proběhne vyhledávání, kdy pro daný typ přístroje najdeme vhodný ovladač. Pak stačí instalovat. Instalace se už provede do předurčených složek pro ovladače a nemusí se víc řešit ukládání. Ovladače by po úspěšném stažení měly být dostupné v paletové nabídce.

Po uskutečnění jedné z možných doplnění ovladačů by měl být ovladač v blokovém diagramu dohledatelný ve: Functions -> Instruments I/O -> Instrument Drivers ->...



Obr. 2.6) Paletová nabídka s ovladači

3. Automatizované centrování hysterezní smyčky

3.1. Význam centrování hysterezní smyčky

Centrování hysterezní křivky je obecně hodně spekulativní věc, na kterou se může každý jednotlivec podívat z různého pohledu. Základem je posunout křivku tak, aby zůstal zachován tvar křivky a nebyla změněna její plocha. Testoval jsem několik způsobů, jak křivku centrovat. Stanovil jsem si prioritu, aby křivka byla vycentrována vůči osám X, Y (H, B).

Cílem centrování je zajistit, aby se každá křivka u všech hysterezních křivek shodovala ve způsobu vystředění. Díky zajištění popsanych podmínek se nám otevírají možnosti dalšího využití na displeji. Například více naměřených vycentrovaných křivek proložím v jedné vizualizaci na sebe. Při centrování na střed stejným způsobem, by se pak měl projevit patrný rozdíl ve tvaru, ploše a asymetrii křivek, jež pak mohou být ukazatelem chyb vzniklých během měření. Dalším příkladem může být měření jednoho vzorku při změně parametrů zdroje, kdy výslednicí bude jeho tvar, jenž můžeme následně porovnat s původní charakteristikou.

3.2. Způsoby centrování a zvolení vhodného centrování

Nabízí se několik způsobů centrování. První z možností je najít těžiště křivky a posunout vhodně křivku podle jejího vlastního těžiště. Prvnímu postupu jsem se věnoval pouze okrajově, protože jsem chtěl eliminovat riziko spočívající v posunu změny tvaru křivky, které mohlo u této možnosti nastat. Křivka v podstatě netvoří úsečku, ale skládá se z jednotlivých bodů, kdy při oddáleném pohledu na křivku se nám může zdát, že tvoří jednotnou část úsečky. Po větším přiblížení a náhledu na nějakou část křivky, může být vidět, že ji opravdu tvoří pouze body. Znázorněná křivka se skládá z jednotlivých bodů, které jsou viditelné při velkém množství vzorků až při přiblížení, byť v oddáleném stavu by se křivka mohl zdát jako spojitá (při bodovém zobrazení křivky).

Druhá možnost spočívá v posunutí každého bodu o určitou vzdálenost. Nejprve jsem hledal nejvhodnější body, ze kterých by byla stanovena výsledná vzdálenost posunutí bodů, aby křivka po posunu byla opravdu na středu souřadného systému. Ke splnění uvedených podmínek jsem zvolil dvě varianty. Jedna varianta vychází z maximálních bodů, tedy z bodů nasycení. Ve druhé variantě budeme vycházet z naměřených bodů B_r , H_c .

Nejprve popíši variantu, kdy vycházíme od bodů B_r a H_c . Zde jsem provedl první posun na ose x (H). Výpočet vhodné vzdálenosti jsem volil podle naměřených bodů H_c a $-H_c$. Zmíněné dva body jsou body, které mají magnetickou indukci B nejvyšší, nebo jinak řečeno nejbližší hodnotě nula.

$$x_H = \frac{|H_c| + |-H_c|}{2} \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (3.1)$$

kde:

x_H ... vzdálenost pro posun po ose H

H_c ... koercivita (kladná)

$-H_c$... koercivita (záporná)

Výslednou hodnotu jsem přičetl ke každé z naměřených hodnot. A tím jsem provedl posun na ose x (H). Podobně jsem postupoval i na ose y (B), kde jsem využil naměřených charakteristických konstant B_r , $-B_r$. Konstanty jsou podobně jak u H_c nejbližší naměřené body k ose x (H). Vhodnou vzdálenost pro posun jsem provedl podobným výpočtem.

$$y_B = \frac{|B_r| + |-B_r|}{2} \quad (T) \quad (3.2)$$

kde:

y_B ... vzdálenost pro posun po ose B

B_r ... remanentní indukce (kladná)

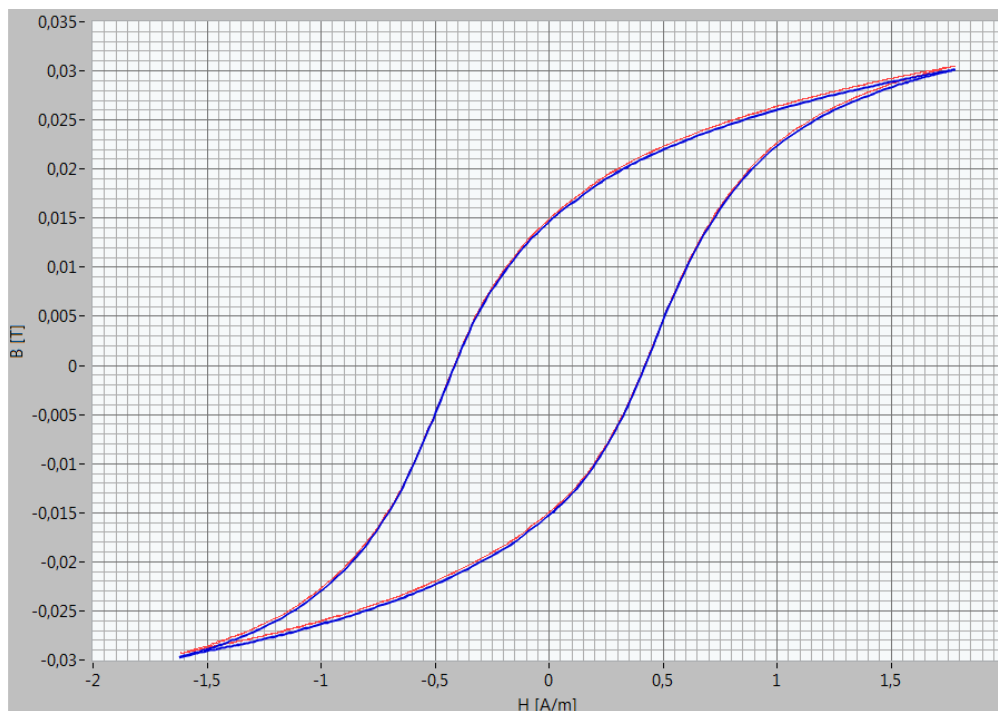
$-B_r$... remanentní indukce (záporná)

Posun na obou osách je v programu prováděn zároveň. Křivka je celkově asymetrická, střed křivky by měl být vycentrovaný podle středových bodů. Ověření správnosti je ideální provést v podobě vizualizace grafu. Tady nám pomáhají pomocné čáry souřadného systému, podle kterých můžeme vidět, že křivka u bodů ležících na hlavních osách má stejnou vzdálenost od středu.

Obdobný postup jsem aplikoval i ve druhé variantě, tj. zvolíme-li za výchozí body maximální hodnoty (B_{max} , H_{max}). Matematická rovnice byla podobná té u předchozí varianty, jen se liší zvolenými proměnnými: remanentní indukce B_r a intenzitou magnetického pole H_c při jednotlivých výpočtech pro posun podle daných os, kde jsem dosazoval naměřené kladné a záporné hodnoty maxim. Zde je problém, že hysterezní křivka, jak je asymetrická, tak vzdálenost těchto bodů byla celkově ve výsledku velká a na posunu v grafu to bylo hodně patrné, že křivka není úplně na středu. Výsledky jednotlivých zkoušených bodů pro posun, jsem posuzoval na výsledku tvaru hysterezní křivky v grafu. Prioritou podmínek byla pozice středu tak, aby nedošlo k narušení tvaru křivky.

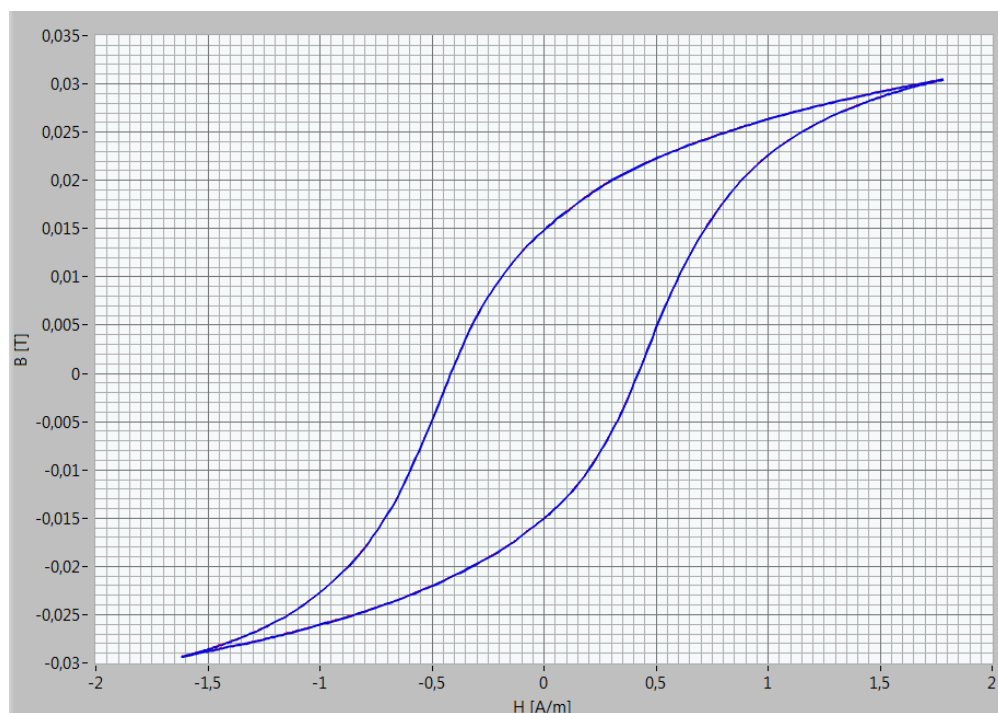
3.3. Rozbor a přesnost zvoleného centrování

U zvoleného principu centrování dosahují přesnosti vystředění v rámci setin. První pokus nevycentrujeme do ideálního stavu, protože po posunu vzniknou nové body B_r a H_c . Z těchto bodů by se počítal nový posun a byl by vykonán posun jednotlivých bodů smyčky, kde mezi body vznikne sice rozdíl, ale v řádu setin až tisícín. Zde je klíčem přesnost vycentrování. Každým centrováním už vystředěného vzorku se snižuje chyba. Pro představu znázorním rozdíly na jednom vzorku.



Obr. 3.1) Proložený jednou už vycentrovaný vzorek

Na obrázku modrá křivka představuje jednou vycentrovaný vzorek a červená představuje po druhé vycentrovaný tentýž vzorek. Je zde vidět nepřesnost v rámci tisícín. Pro vytvoření smyčky by se výpočet prováděl stále dokola a vznikala by nekonečná smyčka. Kdy by se centrování vykonávalo s čím dál větší přesností, dalo by se uvažovat o zanedbatelné chybě. Pokud by se centrování stejného vzorku provedlo znovu, pak je vidět na Obr. 3.2, že chyba je v rozmezí desetitisícín, tedy je zanedbatelná. Z vizuálního pohledu lze nepřesnost centrování s těži poznat.



Obr. 3.2) Dvakrát centrovaná křivka proložená třetím centrováním

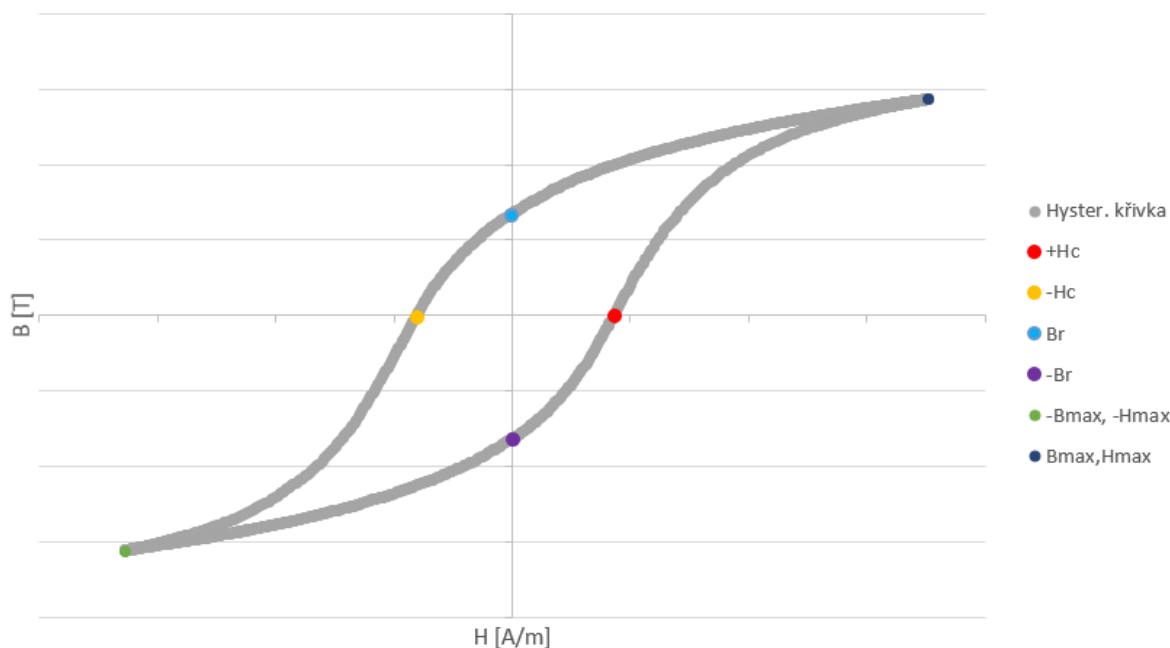
4. Měření charakteristických konstant (B_r, H_c) a ztrát v magnetickém materiálu digitální cestou

Pro získání remanentní indukce B_r a intenzity magnetického pole H_c se vychází ze závislosti $B=f(H)$. Konkrétně je zapotřebí aspoň jeden cyklus magnetizování, kdy po prvotní magnetizaci po dosažení bodu nasycení dochází k poklesu intenzity magnetického pole. Na rozdíl od prvotní magnetizace už se nevrací přes nulový střed.

Tyto body jsou průsečíky s osami. Průsečík s osou magnetické indukce vyznačuje remanentní indukce B_r . Hodnotu H_c vyznačujeme jako průsečík s osou intenzity magnetického pole. Průsečík se chápe jako průchod bodem dané osy. Pokud pracuji pouze s naměřenými hodnotami, nemusí měření obsahovat přesně tento bod.

Dosažení přesně průchodu by bylo možné získat pomocí matematických rovnic pro dopočítání křivky nebo chybějících bodů křivky. To by mohlo být komplikovanější a mohlo by při špatných výpočtech dojít ke zkreslení, z tohoto důvodu volím v práci následující řešení.

Hledám nejbližší naměřený bod, jenž leží co nejbližší k dané ose. Tímhle způsobem si zjistím kladné a záporné nejbližší naměřené body remanentní indukce B_r a intenzity magnetického pole H_c . Může se to zdát ve výsledku také jako zkreslující údaj, kdy nedodržuji princip a neberu hodnoty přímo z průsečíku. Pracuji však s naměřenými hodnotami, což považuji za nejlepší alternativu.



Obr. 4.1) Zobrazení charakteristických konstant

Na Obr. 4.1 jsou zobrazeny charakteristické body na hysterezní křivce. Tyto body lze také odečíst i z manuálně z vykresleného průběhu. Vypočítá se B a H na dílek a dále vynásobí vzdáleností průchodu od středu. Důležitá je přesnost vyčtení průchodu bodu, se kterým se počítá. To je ale manuální postup, pro který by se musely zadávat parametry toroidu k automatickému dopočítání. Měřené prvky

však jsou zapouzdřené v ochranném obalu a počítá se jen s předepsanými parametry. Takže měření toroidu (průřez jádra, počet závitů) pro automatické zpracování tímto způsobem nepřípadá v úvahu. Parametry by se musely ručně přidávat do programu, aby proběhl výpočet.

Dále na Obr. 4.1 jsou vyznačeny body $-B_{\max}$, $-H_{\max}$ a B_{\max} , H_{\max} . K získání bodů je potřeba aspoň jednoho magnetizačního cyklu. Na začátku měření se vychází z křivky prvotní magnetizace, kdy vychází z bodu nula až do bodu nasycení B_{\max} (značí se v literatuře někde také jako indukce nasycení B_s) a maximální intenzity H_{\max} (značí se v literatuře někde jako H_m). Po dosažení nasycení se začne intenzita magnetického pole pomalu snižovat až po bod $-H_c$ (klesá podstatně pomaleji, než když nabývala při prvotní magnetizaci). Od bodu $-H_c$ začne intenzita magnetického pole zase narůstat ale se záporným znaménkem. Opět po dosažení nasycení $-B_{\max}$ intenzita magnetického pole začne klesat až do bodu B_r . Od bodu B_r zase intenzita magnetického pole začne nabývat až dosáhne bodu nasycená. Tím se smyčka uzavře. Bod $-B_{\max}$ je zároveň osově souměrný s bodem B_{\max} . Ve své práci tyto body dohledávám pomocí funkce, která z naměřených hodnot najde nevyšší a nejnižší naměřenou hodnotu. Jelikož se pracuje v tabulce, tak pro nalezení přesných souřadnic bodu využívám číslo řádku, kde se bod v tabulce od dané konstanty nachází. na stejném místě řádku najdu i jeho druhou hodnotu pro jeho konkrétní souřadnice.

Měření magnetických ztrát automaticky není úplně snadné. Pro výpočty jednotlivých ztrát je zapotřebí mnoho neznámých, které nezískáme jen z měření. Ztráty vířivými proudy P_v , hysteretzní ztráty P_h potřebují k výpočtu technické parametry měřeného feromagnetika. Tyhle technické údaje se buď musí předem znát, aby se dal z nich dopočítat třeba objem měřeného prvku. Ztráty přídavné a celkové pak se dopočítávají z vířivých ztrát a hysteretzních ztrát. Pro výpočet měřených ztrát je zapotřebí znát i hustota feromagnetika. Pokud se jedná o čistý prvek, tak se dá dohledat pro jednotlivý prvek v tabulkách.

Na tvar hysteretzní křivky mají vliv i další parametry jako třeba teplota, tlak, změna frekvence. Teplota může během měření u měřeného prvku mírně vzrůst, když se bude během měření vzorek zahřívat. To může vést k mírné změně tvaru hysteretzní křivky.

Změnou frekvence se dá taky měnit tvar hysteretzní křivky, kdy při zvyšování frekvence se může snižovat bod nasycení B_{\max} a navyšovat B_r . To by vedlo ke změně tvaru. Jak velký vliv dokážou mít tyto další parametry ke změně tvaru hysteretzní křivky můžeme zjistit buď výpočtem obsahu křivky, nebo vizuálně, kdy třeba při měření změny frekvence vycentrujeme každou nově naměřenou hysteretzní křivku na střed, a pak ve výsledku je proložíme všechny v jednom grafu, kde by se mohli ověřit i vizuálně změny tvaru hysteretzních křivek. Zde by bylo možné jeden vzorek ovlivňovat parametry a sledovat změnu výsledných hysteretzních křivek oproti prvotní. Pro výchozí by se zvolili konkrétní podmínky, od kterých by se změny dalších vnějších parametrů daly vyčíst.

5. Tvorba softwarové aplikace pro automatizované měření charakteristických konstant a ztrát magnetických materiálů

5.1. Software a cíle aplikace

5.1.1. Cíle a význam aplikace

Dnešní doba se soustřeďuje na digitalizaci, zrychlení a usnadnění složitějších úkonů v praktické činnosti pomocí moderních technologií a SW aplikace. To považuji i za cíl mé bakalářské práce, která má ulehčit a zautomatizovat měření stávající laboratorní úlohy. Další cílem je eliminovat lidský faktor během měření a celé měření co nejvíce zautomatizovat. SW aplikace by měla být schopna vykreslit hysterezní smyčku a získat charakteristické hodnoty z naměřených dat. Nebude chybět ukládání dat pro možnou další práci s naměřenými hodnotami.

5.1.2. Zvolený software a první kroky

V prvních krocích mě čekalo seznámení s problematikou při měření magnetických materiálů a následné zobrazení hysterezní smyček a charakteristických hodnot. Nedílnou součástí k pokroku v mé práci bylo i nastudování měřicích přístrojů, abych vhodně uplatnil měřidla do laboratorní úlohy.

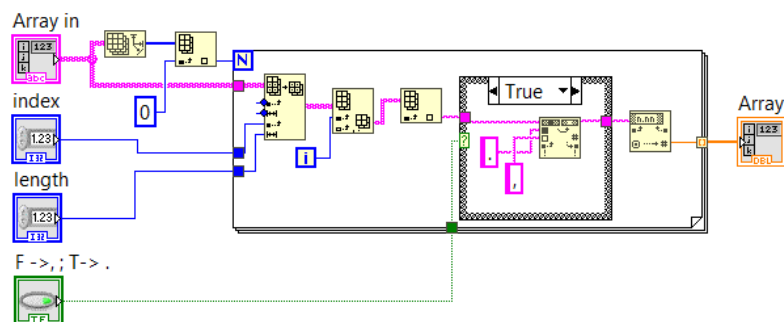
Jako vývojový nástroj pro softwarovou aplikaci jsem zvolil vývojové prostředí LabVIEW. Jedná se o vývojové prostředí na bázi grafického programování, které je nejpoužívanější v oblasti měření a testování. Tvoří základ nové technologie s plnohodnotným zapojením výpočetní techniky do oblasti měření – virtuální instrumentace. Využívá se k řízení různých systémů, zpracování dat či k vizualizaci. Umožňuje rychlý vývoj aplikací, možnost přeprogramovat vytvořené aplikace podle nových požadavků, což v reálných podmínkách s běžnými nástroji a součástkami může být velmi nákladné nebo až neuskutečnitelné. Ve vývojovém prostředí se vytváří program pomocí grafických symbolů tvořících plnohodnotné ekvivalenty datových typů a programovatelných struktur z textově orientovaných programovacích jazyků. Příkladem může být blok, jež je navržený k nějaké funkci (G-jazyk). [6]

Využil jsem obslužných programů k osciloskopu, které lze stáhnout ke konkrétnímu měřicímu přístroji přímo z oficiálních stránek americké firmy National Instruments. Vývojové prostředí LabVIEW je produktem této firmy. Obslužné programy jsou navrženy k základnímu pracování s daným přístrojem. Usnadní a zrychlí to práci když, programátor nemusí vyvíjet základní funkce k obsluze přístroje znovu, ale jen použije hotovou funkci z obslužného programu pro daný měřicí přístroj. V práci jsem využil obslužný program pro práci s osciloskopem. [7]

Při návrhu SW aplikace jsem začínal od prvních měření, kdy jsem získal výsledky měření a testoval jsem, jakým způsobem osciloskop ukládá a zpracovává naměřená data. Získaná data jsem následně zpracovával pomocí programu Microsoft Excel. Data jsem redukoval jejich předzpracováním, kdy jsem vybíral z naměřených dat pouze vhodné vzorky. Vhodným vzorkem byly naměřené hodnoty,

V základu mnou navržené aplikace tak byla vytvořena část pro vyčítání hodnot z .csv souboru. Do .csv souboru byla ukládána všechna provedená měření. V první řadě byla aplikace vybavena pro čtení a práci s hodnotami z datového souboru. Poté byla doplněna komunikace s osciloskopem, kdy SW aplikace získává data přímo z osciloskopu prostřednictvím komunikace přes odpovídající datové rozhraní.

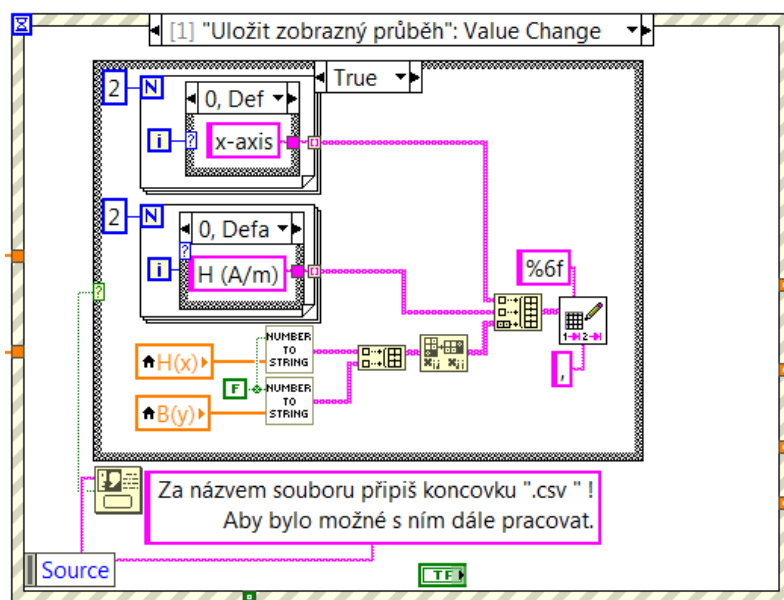
desetinná tečka na místo čárky, tak aby nedošlo k ořezání čísla, je tam možnost pro přepis u hodnot desetinné tečky za čárku.



Obr. 5.2) Převod z řetězce 2D pole na 1D pole číselné

Jako druhý krok popíši možnost, kdy data bude SW aplikace získávat z osciloskopu. Využil jsem obslužných programů pro inspiraci. Obslužné programy jsou volně dostupné ke stažení pro daný osciloskop. Tady konkrétně je to pro osciloskop DSO6012A od společnosti Agilent Technologies. Zvolené připojení jde použít pro celou řadu osciloskopů. Zde se používá propojení s osciloskopem přes USB. Pokud máme stažený obslužný program pro daný přístroj, stačí jen daný přístroj připojit k PC a je připraven k měření. Využívá se NI MAX, kde se nám zobrazí připojený přístroj, vidíme jeho adresu, kterou v aplikaci musíme nastavit pro propojení.

5.2.2. Ukládání souborů

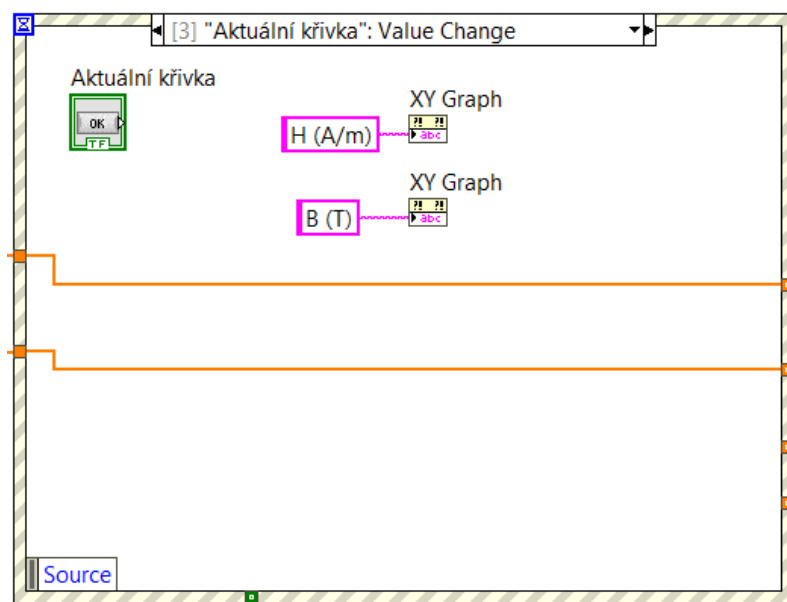


Obr. 5.3) Ukládání zvoleného průběhu

Pokud už nějaká data měříme, tak je můžeme i uložit. Toho jsem se držel při tvoření aplikace. Následuje popis postupu ukládání naměřených dat. K načítání a ukládání dat využívám soubory s koncovkou .csv. Na Obr. 5.3 je část programu pro ukládání naměřené křivky. Dají se uložit pro dvě varianty, a to pro vycentrovanou a nevycentrovanou křivku (ukládá jednu právě zobrazovanou křivku na hlavním panelu). Ukládání naměřených dat jsem volil tak, aby se mohlo i touto SW aplikací znovu

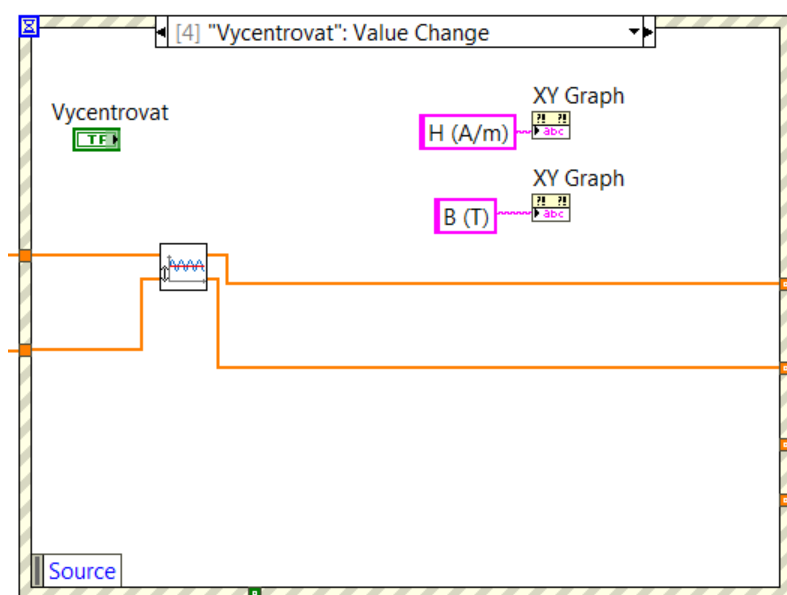
načíst a opětovně si data vizualizovat. Je zde znovu možnost u ukládaných hodnot měnit desetinou čárku na desetinné místo, nebo to ukládat s desetinnou tečkou. Kdyby data měla jít do nějaké softwarové aplikace, která čárku nebere jako desetinný oddělovač, aby to šlo pozměnit a uložit dle potřeby.

5.2.3. Zpracování příchozích dat po vykreslování



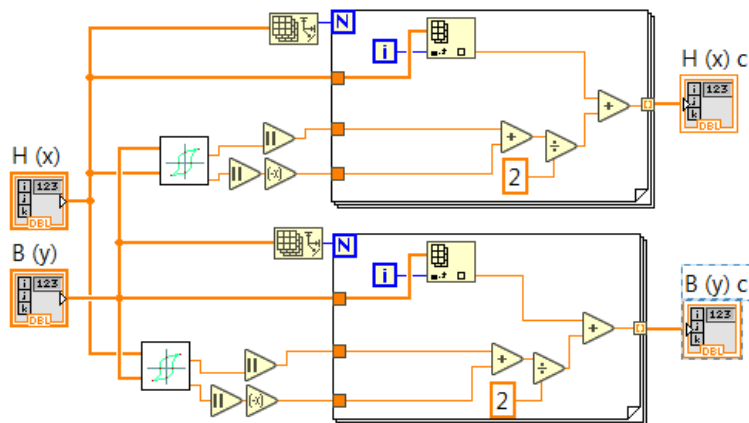
Obr. 5.4) Stav Aktuální křivka

Po nahrání dat je potřeba křivku ještě zobrazit na čelním panelu. K tomu může posloužit tlačítko aktuální křivka. Provede vykreslení křivky z načítaných dat při zobrazení. Pro danou událost funguje ukládání hodnot.

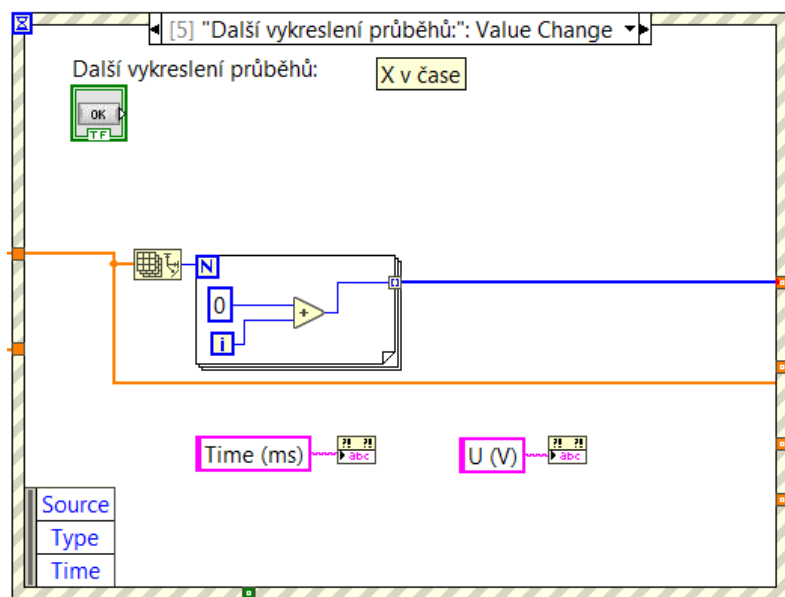


Obr. 5.5) Centrování křivky

Na Obr. 5.5 je zobrazena struktura centrování křivky. Zde podle vybraných hodnot (jedná se o body B_r , $-B_r$, H_c , $-H_c$) hledá rozdíl, o který se všechny body posunou, aby došlo k vycentrování křivky ke středu. Data po průchodu danou strukturou se dají uložit stejně jako data z aktuální křivky. Hodnoty budou uloženy s posunem (neboli uloží hodnoty podle vycentrovaného stavu). SubVI, která se nachází v této struktuře je na Obr. 5.6. Zde je použito i SubVI (blokové zapojení Obr. 5.12), pro získání charakteristických konstant, podle kterých probíhá centrování křivky.

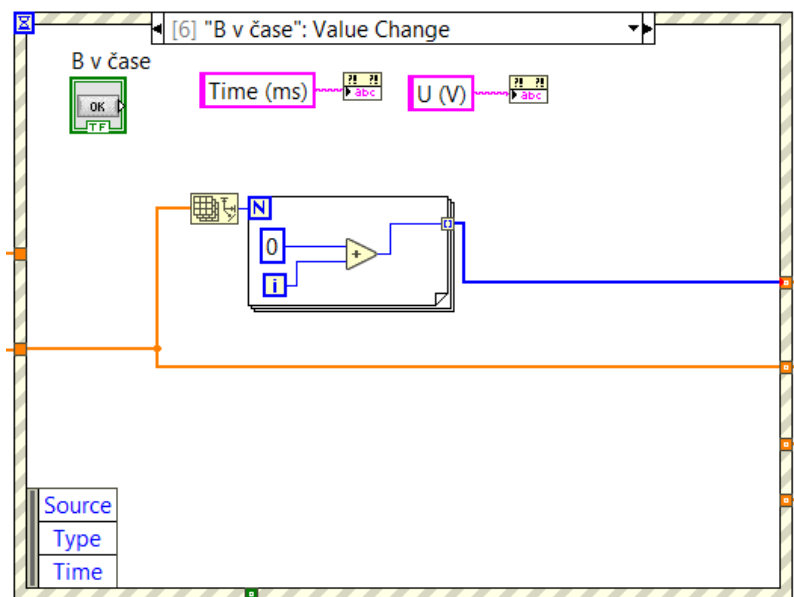


Obr. 5.6) SubVI použité ve struktuře pro centrování



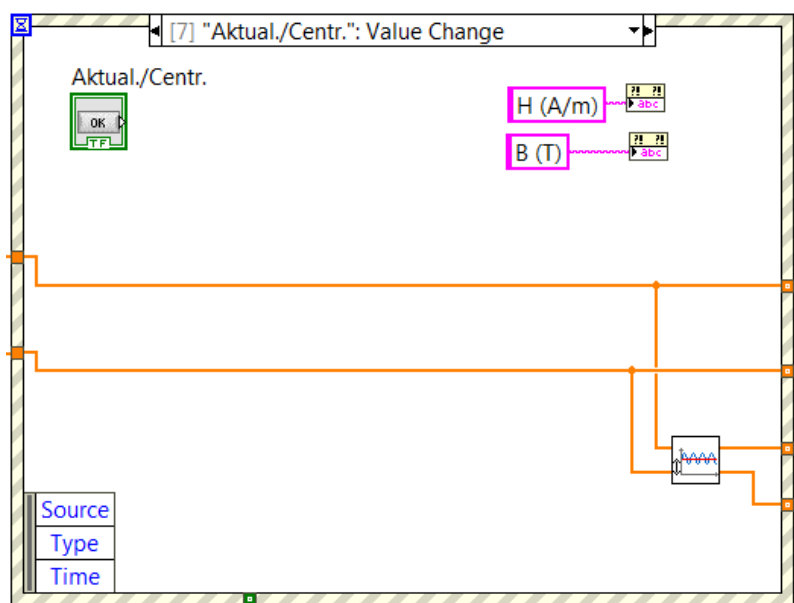
Obr. 5.7) Vykreslení průběhu H v čase

Struktura průběh X v čase není úplně specifické označení o co se jedná pro tento typ zobrazovaného průběhu. Jedná se o data, která nám přichází z kanálu X . Na kanál X je přiváděno napětí z odporu R_p který je za primárním vinutím. Jedná se spíš o zobrazení napětí U (V) na odporu R_p v čase.



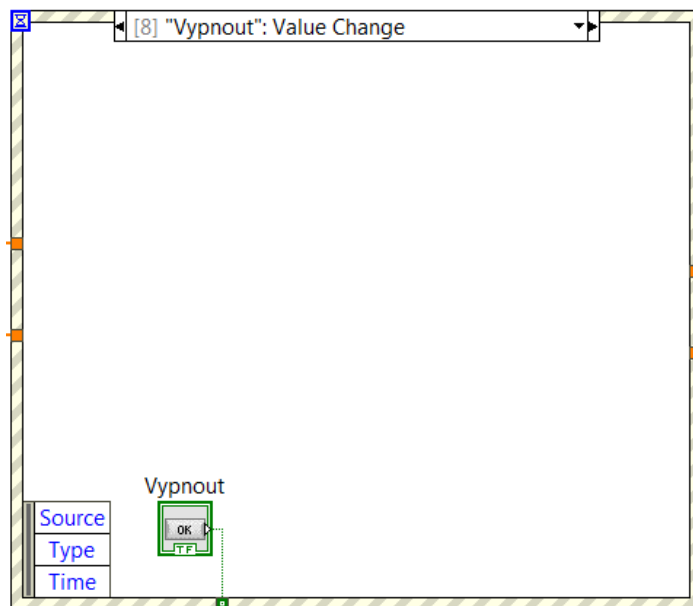
Obr. 5.8) Vykreslení průběhu B v čase

Podobně i zde není popis B v čase úplně specifický. Zde se jedná o vykreslení napětí U (V) z dat získávaných z kanálu Y v čase. Dané napětí je bráno z výsledných dat, tudíž je ovlivněné RC článkem. Pokud se odpojí RC článek, může posloužit k vykreslení průběhů pro amplitudovou charakteristiku.



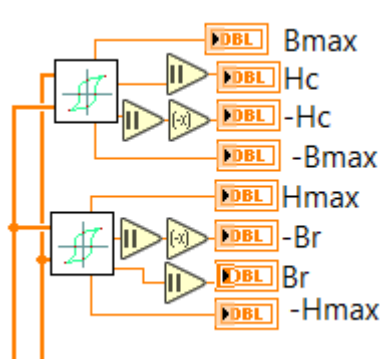
Obr. 5.9) Vykreslení aktuální křivky a vycentrované křivky v jednom grafu

V této dané události je spojení aktuální křivky a vycentrované křivky do jedné části pro vykreslení v grafu. Slouží spíše k vizuálnímu zobrazení, jak se křivka po centrování posunula. Každá z křivek je barevně rozdělena, tak změny mohou být patrné i z pohledu. SubVI je použito stejně jako při centrování (Obr. 5.6).



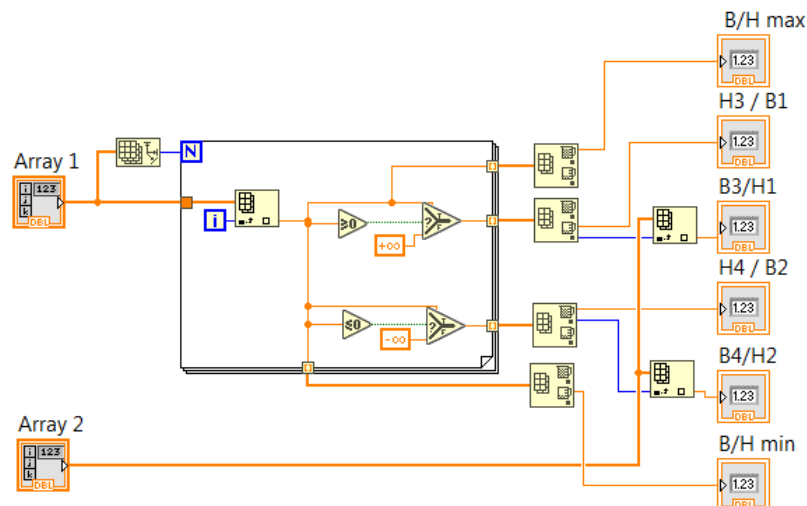
Obr. 5.10) Zastavení celého programu

Událost, co je na Obr. 5.10 slouží k ukončení hlavní smyčky while, tudíž k zastavení běhu celého programu.



Obr. 5.11) Získání charakteristických konstant

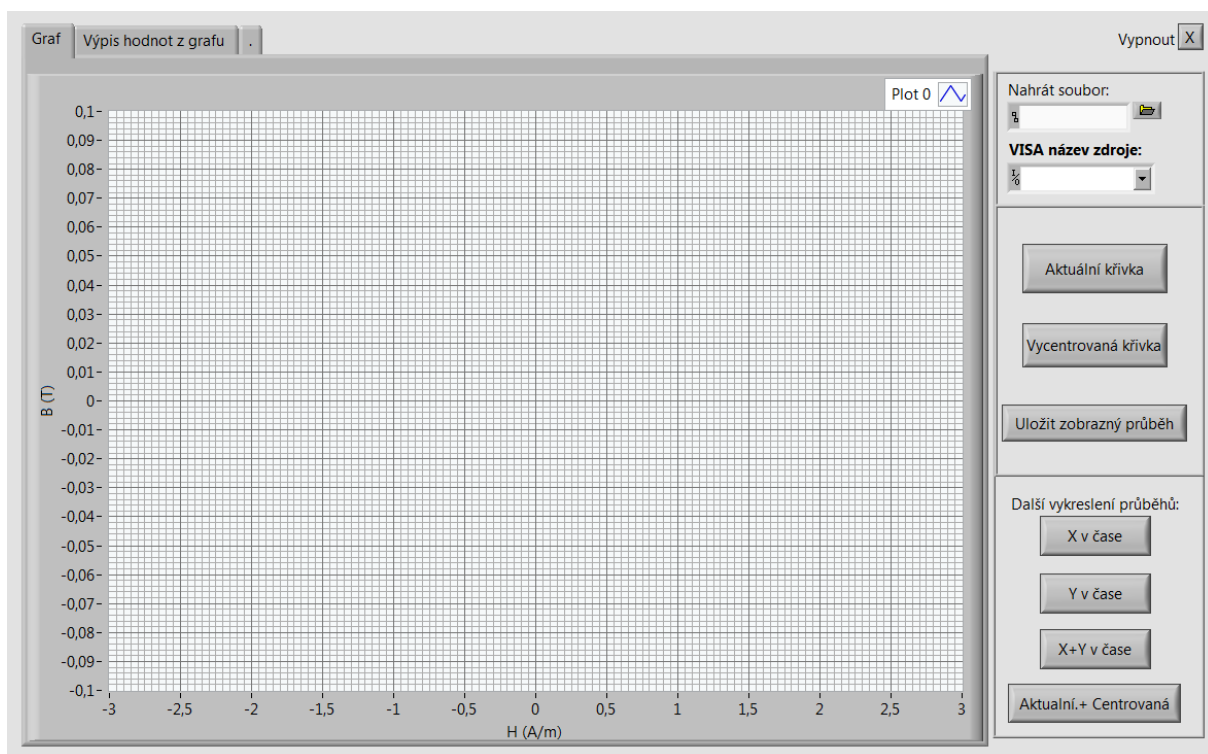
Hlavní část pro získávání charakteristických konstant se ukrývá v SubVI. SubVI je pro obě zpracování v podstatě stejné, rozdíl je jen na vstupních hodnotách SubVI, kdy každá větev zpracovává hodnoty z dané osy. Pro horní větev do horního vstupu jdou hodnoty podle označení $H(x)$ a do spodního $B(y)$. U $H(x)$ se jedná o hodnoty pro x osu a u $B(y)$ se jedná o hodnoty pro y osu. Pro spodního větev to je naopak. Hodnoty z jednotlivých výstupů ze SubVI se nachází na hlavním panelu v druhé záložce.



Obr. 5.12) SubVI pro získání charakteristických konstant

Automatické hledání charakteristických bodů zde funguje na jednoduchém principu. Základem je smyčka for, kde nám postupně přicházejí hodnoty. Ty jsou tříděny do dvou větví na principu, jestli jsou větší nebo menší než nula. Tak rozlišují hodnoty kladné od záporných. Horní větev na Obr. 5.12 propouští všechny kladné hodnoty větší než nula a spodní větev propouští všechny hodnoty menší než nula. Postup popíši na horní větvi, kde jsou propouštěny hodnoty kladné, tedy větší než nula. Pokud přichází hodnota splňuje podmínku, nijak se nemění. Pokud nesplňuje, byla by nahrazena nulou jako false. Po cyklu for už dochází pomocí bloku k vyhledání maximálních a minimálních hodnot. Popřípadě jestli se jedná o jednu ze souřadnic, tak jelikož oba sloupce pro hodnoty na X a Y ose mají stejný počet řádků ve sloupci, řádky odpovídají souřadnici konkrétního bodu. Tak pokud víme souřadnici v jednom sloupci pro daný bod, dokážeme najít i druhou souřadnici s hodnotou pro konkrétní bod. Takhle automaticky vyhledává nejbližší naměřené body. Vzhledem k tomu, že hledá nejbližší naměřený bod, tak se může jednat i o záporné číslo. Tudíž znaménka pro konkrétní charakteristickou hodnotu jsou ošetřena na výstup podle toho, jaká hodnota by to měla být (kladná nebo záporná).

5.2.4. Čelní (front) panel



Obr. 5.13) Hlavní panel

V náhledu čelního panelu jsou dvě záložky pro práci s měřením. Čelní panel na Obr. 5.13 má celou plochu pokrytou vykreslením grafu.

V indikačním prvku graf na čelním panelu lze pomocí dalších nástrojů změnit typ osy a vykreslí jiné průběhy. Jedná se o nastavení každé jednotlivé osy. Pro měření úlohy se to může využít pro zobrazení amplitudové charakteristiky.

Hlavní ovládací prvek je aktuální křivka, kdy po každém kliknutí nám vrátí nebo vykreslí načtenou křivku. Dále pomocí Vycentrováná křivka se křivka vycentruje z daných dat k nulovému průsečíku obou os. Hodnoty z Aktuální a Vycentrováné křivky se dají uložit a to tak, že se jednoduše vybere typ, který se zároveň zobrazí na indikátoru grafu. Pak následně při kliknutí uložit, se provede uložení pro daný typ.

Dále je možné zobrazit i jednotlivý kanál zvlášť v podobě tlačítek X v čase a Y v čase.

Graf
Výpis hodnot z grafu
Vypnout

Naměřené hodnoty:

Hc 0 (A/m) Br 0 (T) Hmax 0 (A/m) Bmax 0 (T)
-Hc -0 (A/m) -Br -0 (T) -Hmax 0 (A/m) -Bmax 0 (T)

Pro dopočítání doplň:

Dopočítané hodnoty:

I 0 (mA) Im 0 (mA)
U 0 (mV) U2SA 0 (mV)
f 0 (Hz) Hm NaN (A/m)
N1 0 (-) Bm NaN (T)
N2 0 (-) μ_a NaN (H/m)
Is 0 (m)
S 0 (m²)

Vypočítat

Nahrát soubor:

VISA název zdroje:

Aktuální křivka

Vycentrováná křivka

Uložit zobrazný průběh

Další vykreslení průběhů:

X v čase

Y v čase

X+Y v čase

Aktuální.+ Centrováná

Obr. 5.14) Hlavní panel, druhá záložka

V druhé záložce indikačního prvku se nachází zpracovaná data naměřených a dopočítaných charakteristických veličin. Naměřená data charakteristických hodnot jsou vypsaná podle toho, jestli se jedná o aktuální křivku nebo vycentrovanou. Pro výpočet další hodnoty je potřeba dopsat určité parametry měřeného vzorku.

6. Ověření funkčnosti aplikace

6.1. Zadání laboratorní úlohy

I. Zadání laboratorní úlohy

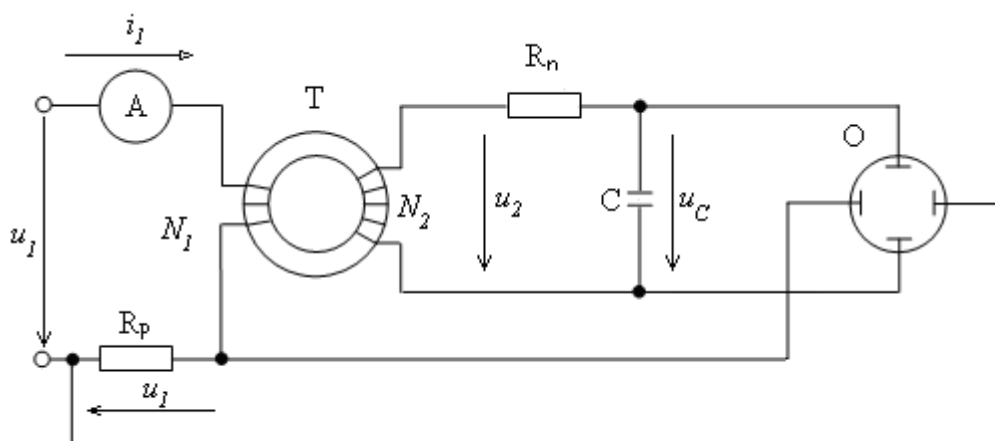
1. Pomocí osciloskopu a při měřicí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$, zobrazte postupně dynamické hysterezní smyčku zadaného vzorku (toroidu) z feromagnetického materiálu. Při zobrazování si vyzkoušejte vliv nastavení různých hodnot integračního členu RC na tvar smyčky, resp. na její zkreslení. U správně zobrazené hysterezní smyčky vyznačte hodnoty zbytkového magnetizmu (remanence) B_r a koercitivní síly H_c . V závěrečném hodnocení uveďte důvody zkreslení hysterezní smyčky při nevhodně zvolené časové konstantě integračního členu.

2. Určete velikost měřítek horizontální a vertikální osy stínítka osciloskopu a poté stanovte co nejpresněji hodnotu koercitivní síly H_c a remanence B_r u obou vzorků.

3. Na stejném vzorku proměřte komutační křivku (amplitudovou charakteristiku). Měření proveďte při těchto hodnotách magnetizačního proudu I : 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250 mA. Naměřené a vypočtené hodnoty zpracujte do tabulky a sestojte grafické závislosti $B_m = f(H_m)$. Z grafu určete největší hodnoty relativní amplitudové permeability μ_{amax} .

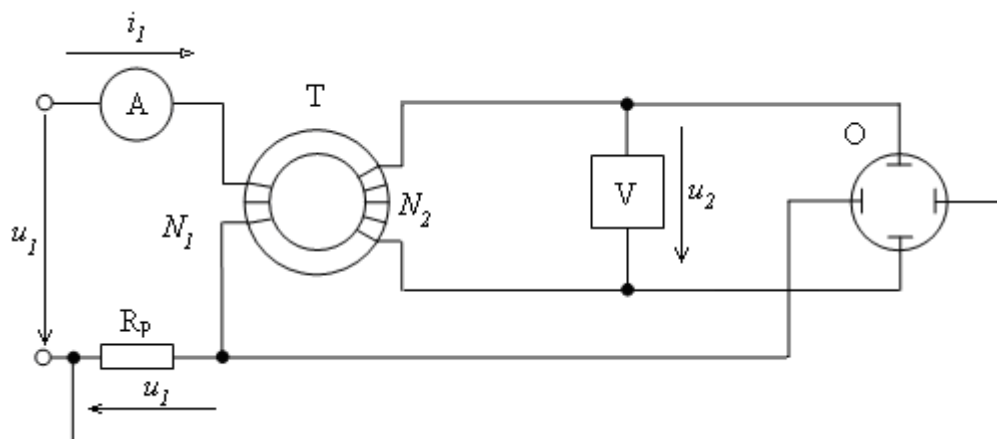
Při měření komutační křivky pozorujte pomocí osciloskopu tvar křivky magnetizačního proudu a tvar napětí naindukovaného v měřicím (sekundárním) vinutí. Oba tyto průběhy (zobrazené při $I = 250 \text{ mA}$) zakreslete do rastrového okna. Tvar naindukovaného napětí zdůvodněte v závěrečném hodnocení.

II. Schéma zapojení pro zobrazení hysterezní křivky



Obr. 6.1) Schéma zapojení pro zobrazení hysterezní křivky

III. Schéma zapojení pro měření komutační křivky



Obr. 6.2) Měření amplitudové charakteristiky

IV. Vzorce uplatněné pro dopočítání konstant při měření:

Střední délka siločáry vzorku:

$$l_s = \pi \cdot \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right) \quad (m) \quad (6.1)$$

kde:

l_s ... střední délka siločáry vzorku

D_1 ... vnitřní průměr toroidu

D_2 ... vnější průměr toroidu

Průřez jádra vzorku:

$$S = a \cdot b \quad (m^2) \quad (6.2)$$

kde:

S ... průřez jádra vzorku

a ... šířka

b ... výška

Amplituda magnetizačního proudu:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} \quad (A) \quad (6.3)$$

kde:

I_m ... magnetizační proud

I... naměřený proud

Amplituda intenzity magnetického pole:

$$H_{am} = \frac{N_1 \cdot I_m}{l_s} \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (6.4)$$

kde:

H_{am}... amplituda intenzity magnetického pole

N₁... počet primárních závitů vzorku

I_m... magnetizační proud

l_s... střední délka siločáry vzorku

Střední aritmetická hodnota indukovaného napětí U₂:

$$U_{2SA} = \frac{U_2 \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \quad (V) \quad (6.5)$$

kde:

U_{2SA}... střední aritmetická hodnota indukovaného napětí U₂

U₂... naměřené indukované napětí

Amplituda magnetické indukce

$$B_{am} = \frac{U_{2SA}}{4 \cdot f \cdot N_2 \cdot S} \quad (T) \quad (6.6)$$

kde:

B_{am}... amplituda magnetické indukce

U_{2SA}... střední aritmetická hodnota indukovaného napětí U₂

f... frekvence

N₂... počet sekundárních závitů vzorku

S... průřez jádra vzorku

Amplitudová permeabilita:

$$\mu_a = \frac{B_{am}}{\mu_0 \cdot H_{am}} \quad (H \cdot m^{-1}) \quad (6.7)$$

kde:

μ_{am}... amplitudová permeabilita

B_{am} ... amplituda magnetické indukce

H_{am} ... amplituda intenzity magnetického pole

μ_0 ... permeabilita vakua

Maximální amplitudová permeabilita:

$$\mu_{amax} = \frac{B_{amax}}{\mu_0 \cdot H_{amax}} \quad (H \cdot m^{-1}) \quad (6.8)$$

kde:

μ_{amax} ... maximální amplitudová permeabilita

B_{amax} ... maximální amplitudová magnetická indukce

H_{amax} ... maximální amplitudová intenzita magnetického pole

μ_0 ... permeabilita vakua

6.2. Měření na prvním vzorku podle laboratorní úlohy pomocí vytvořené SW aplikace

6.2.1. Zobrazení hysterezní smyčky a určení hodnot remanence a koercivity

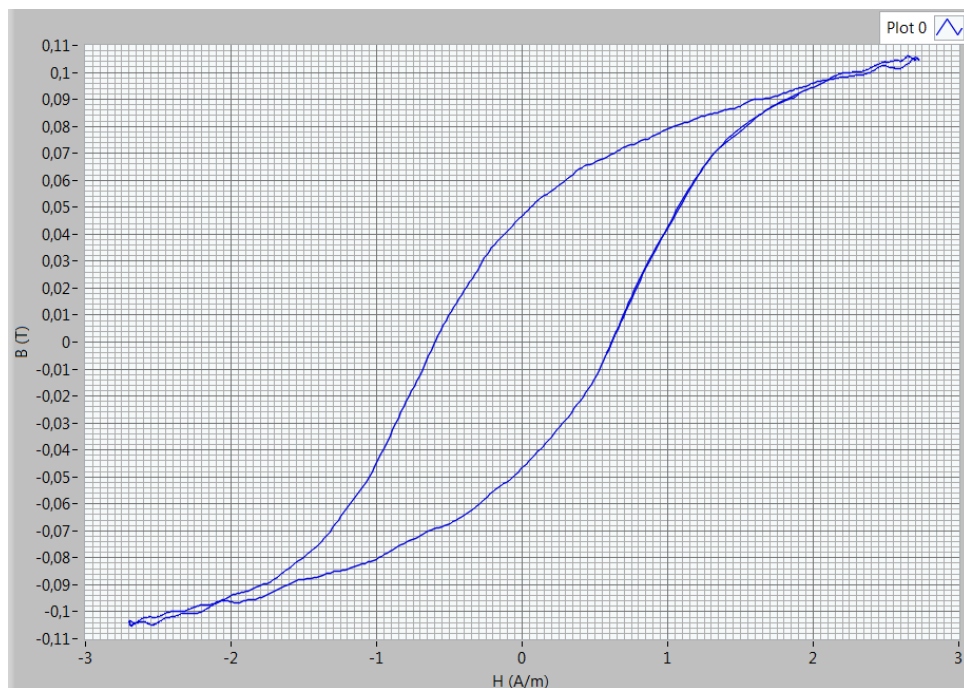
I. Zobrazení hysterezní smyčky

Korektní hysterezní smyčka měřená při parametrech:

$f = 58,82 \text{ Hz}$

$R = 8 \text{ k } \Omega$

$C = 8 \mu\text{F}$



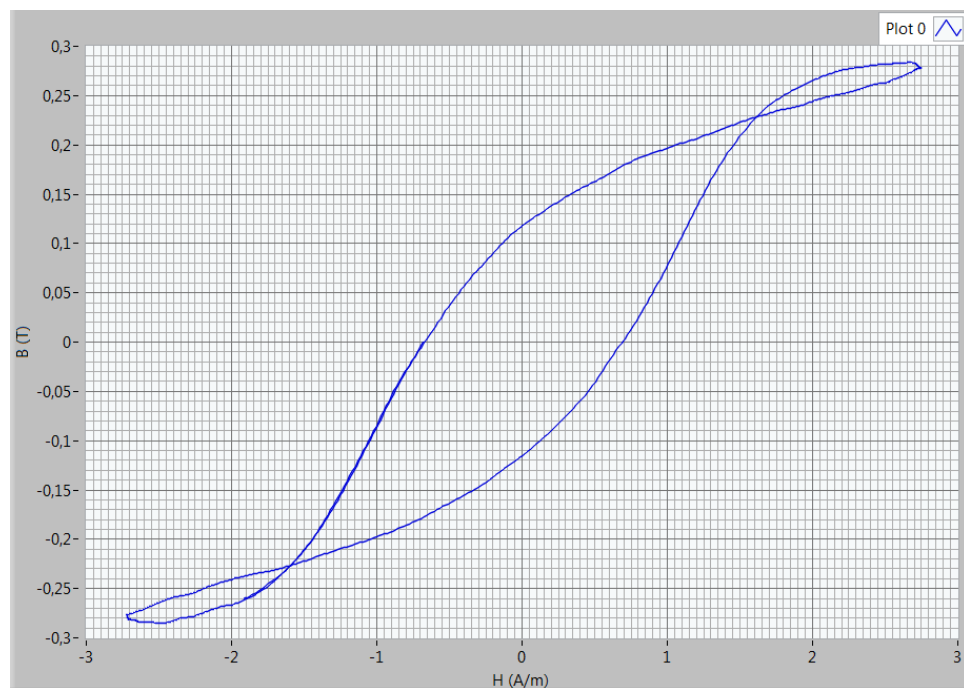
Obr. 6.3) Vykreslení hysterezní smyčky při správném zvolení RC článku u prvního vzorku

Nekorektní hysterezní smyčka měřená při parametrech:

$f = 58,82 \text{ Hz}$

$R = 3 \text{ k}\Omega$

$C = 8 \mu\text{F}$



Obr. 6.4) Vykreslení hysterezní smyčky při špatném zvolení RC článku u prvního vzorku

II. Určení hodnot remanence a koercivity

Zjištěné parametry:

Předřadný odpor primárního vinutí = $8,2 \Omega$

Horizontální citlivost osciloskopu = $1 \text{ V/d} = 1 \text{ V/cm}$

Vertikální citlivost osciloskopu = $50 \text{ mV/d} = 50 \text{ mV/cm}$

Počet primárních závitů vzorku $N_1=15$ závitů

Počet sekundárních závitů vzorku $N_2=300$ závitů

Vnitřní průměr toroidu $D_1=19,8\text{mm}$

Vnější průměr toroidu $D_2=32 \text{ mm}$

Výška $b=6 \text{ mm}$

Šířka $a=12,9 \text{ mm}$

Naměřené hodnoty:

H _c	0,595355	(A/m)	B _r	0,0473518	(T)	H _{max}	2,72277	(A/m)	B _{max}	0,106057	(T)
-H _c	-0,615813	(A/m)	-B _r	-0,0471293	(T)	-H _{max}	-2,70311	(A/m)	-B _{max}	-0,10514	(T)

Obr. 6.5) Charakteristické body pro správně zvolenou hysterezní smyčku u prvního vzorku

Tab. 1) Hodnoty naměřené SW aplikací pro první vzorek

H _c (A/m)	B (T)	H _{max} (A/m)	B _{max} (T)	-H _c (A/m)	-B _r (T)	-H _{max} (A/m)	-B _{max} (T)
0,5954	0,0474	2,7228	0,1061	-0,6158	-0,0471	-2,7031	-0,1051

6.2.2. Měření komutační křivky

I. Měření komutační křivky

Tab. 2) Tabulka získaných hodnot pro komutační křivku prvního vzorku

Naměřeno Multimetry		Dopočítáno z naměřených hodnot				
I	U ₂	I _m	U _{2SA}	H _{am}	B _{am}	μ _a
(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	(A/m)	(T)	(H/m)
0	0	0	0	0	0	-
9,42	38,82	13,32	34,95	2,455	0,0064	2073,77
19,84	93,89	28,06	84,53	5,17	0,0155	2381,41
28,78	194,9	40,7	175,47	7,5	0,0321	3407,82
41,08	283,8	58,1	255,51	10,705	0,0468	3476,47
50,12	393,1	70,88	353,91	13,061	0,0648	3946,83
61,34	516,2	86,75	464,74	15,986	0,0851	4234,78
70,04	616,3	99,05	554,87	18,253	0,1016	4427,94
99,8	895,2	141,14	805,96	26,008	0,1475	4513,84
119,1	1038	168,43	934,53	31,038	0,1711	4385,73
151,2	1229	213,83	1106,49	39,403	0,2025	4090,31
200	1348	282,84	1213,6	52,121	0,2221	3391,68

Vypočítané hodnoty SW aplikací pro zvýrazněný řádek v tabulce (Tab. 2).

Pro dopočítání doplň:

Dopočítané hodnoty:

I 99,8 (mA)

Im 141,139 (mA)

U 895,2 (mV)

U2SA 805,963 (mV)

f 58,82 (Hz)

Hm 26,0083 (A/m)

N1 15 (-)

Bm 14,7526 (T)

N2 300 (-)

μa 451384 (H/m)

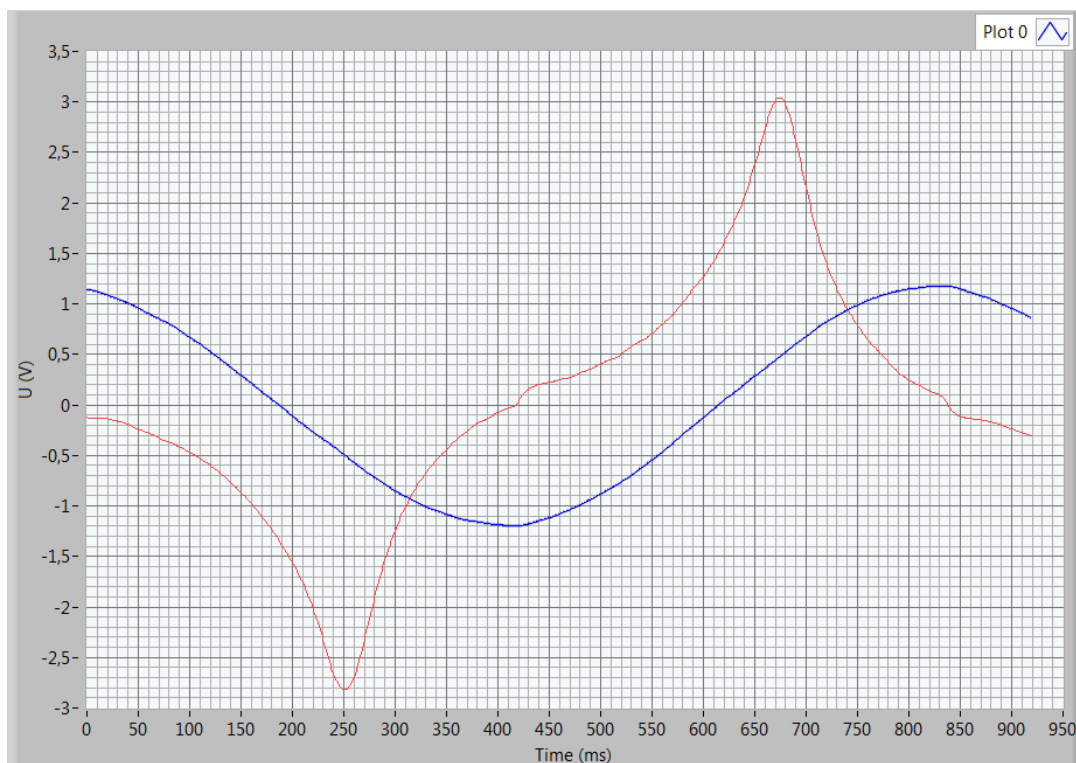
Is 0,0814 (m)

S 7,74E-7 (m^2)

Vypočítat

Obr. 6.6) Obrázek výsledných hodnot pro vyznačený řádek v tabulce

Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek:



Obr. 6.7) Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek u prvního vzorku

Pro ověření dosazení do vzorců:

Střední délka siločáry vzorku:

$$l_s = \pi \cdot \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right) = \pi \cdot \left(\frac{19,8 + 32}{2} \right) = 81,4 \text{ mm} = 0,0814 \text{ m} \quad (6.9)$$

Průřez jádra vzorku:

$$S = a \cdot b = 6 \cdot 12,9 = 77,4 \text{ mm}^2 = 7,74 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (6.10)$$

Amplituda magnetizačního proudu:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 99,8 \cdot \sqrt{2} = 141,14 \text{ mA} = 0,14114 \text{ A} \quad (6.11)$$

Amplituda intenzity magnetického pole:

$$H_{am} = \frac{N_1 \cdot I_m}{l_s} = \frac{15 \cdot 0,14114}{0,0814} = 26,009 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.12)$$

Střední aritmetická hodnota indukovaného napětí U_2 :

$$U_{2SA} = \frac{U_2 \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = \frac{895,2 \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = 805,96 \text{ mV} = 0,80596 \text{ V} \quad (6.13)$$

Amplituda magnetické indukce

$$B_{am} = \frac{U_{2SA}}{4 \cdot f \cdot N_2 \cdot S} = \frac{0,80596}{4 \cdot 58,82 \cdot 300 \cdot 7,74 \cdot 10^{-5}} = 0,1475 \text{ T} \quad (6.14)$$

Amplitudová permeabilita:

$$\mu_{am} = \frac{B_{am}}{\mu_0 \cdot H_{am}} = \frac{0,1475}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 26,008} = 4513,84 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.15)$$

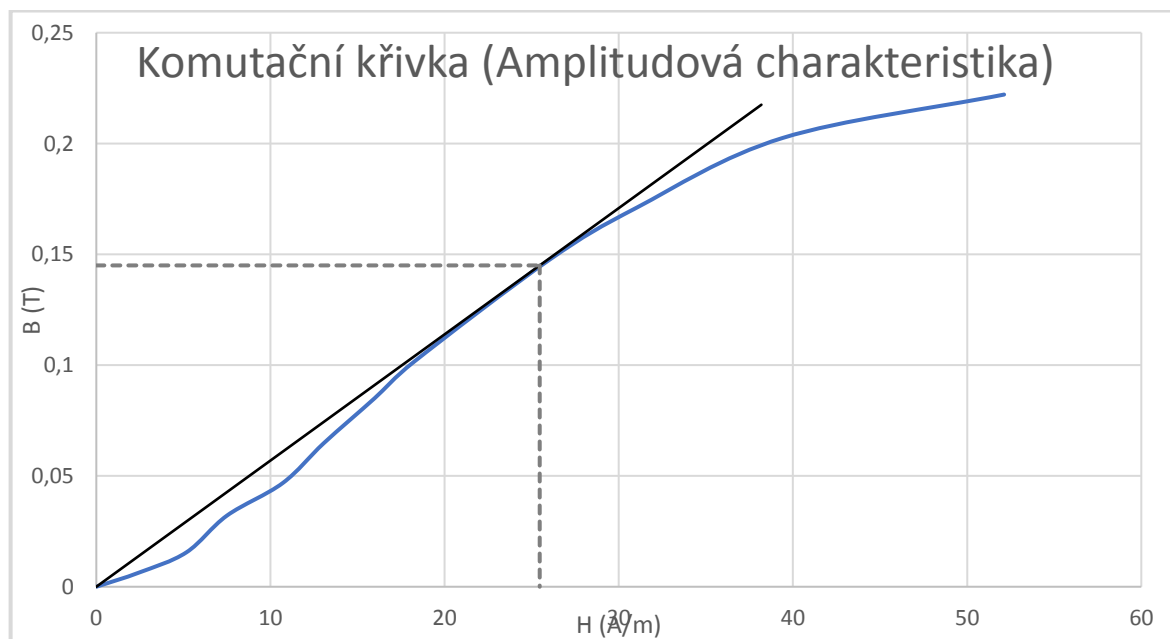
Maximální hodnoty vyčteny z grafu:

$$H_{amax} = 25,458 \text{ A/m}$$

$$B_{amax} = 0,145 \text{ T}$$

Maximální amplitudová permeabilita:

$$\mu_{amax} = \frac{B_{amax}}{\mu_0 \cdot H_{amax}} = \frac{0,145}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25,458} = 4532,46 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.16)$$



Obr. 6.8) Závislost $B_m = f(H_m)$ z měření komutační křivky u prvního vzorku

6.3. Měření na druhém vzorku podle laboratorní úlohy pomocí vytvořené SW aplikace

6.3.1. Zobrazení hysterezní smyčky a určení hodnot remanence a koercivity

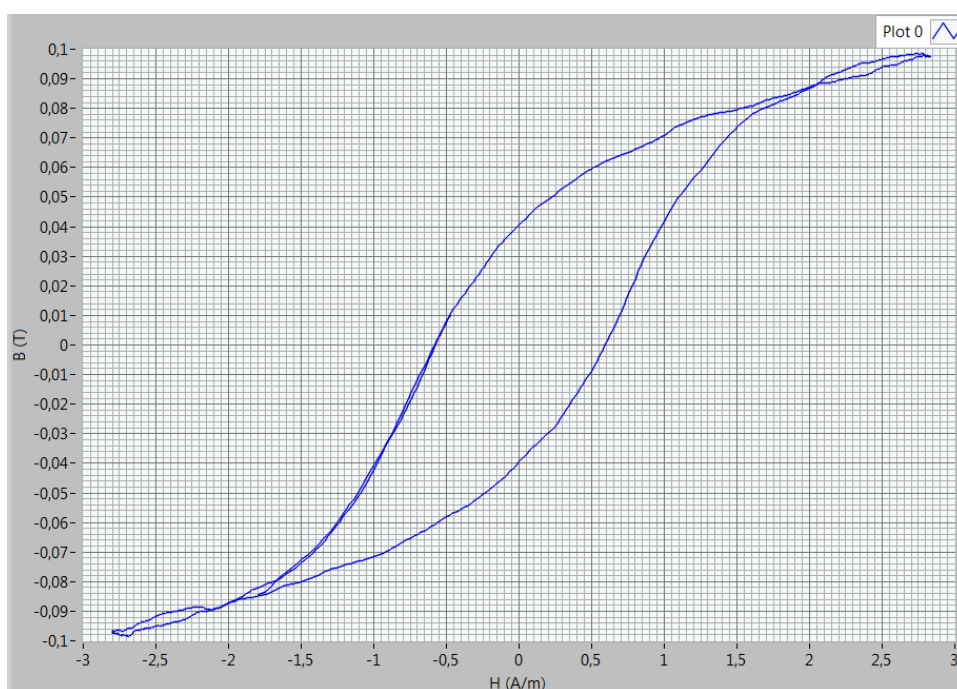
I. Zobrazení hysterezní smyčky

Korektní hysterezní smyčka měřena při parametrech:

$$f = 58,82 \text{ Hz}$$

$$R = 8 \text{ k} \Omega$$

$$C = 8 \mu\text{F}$$



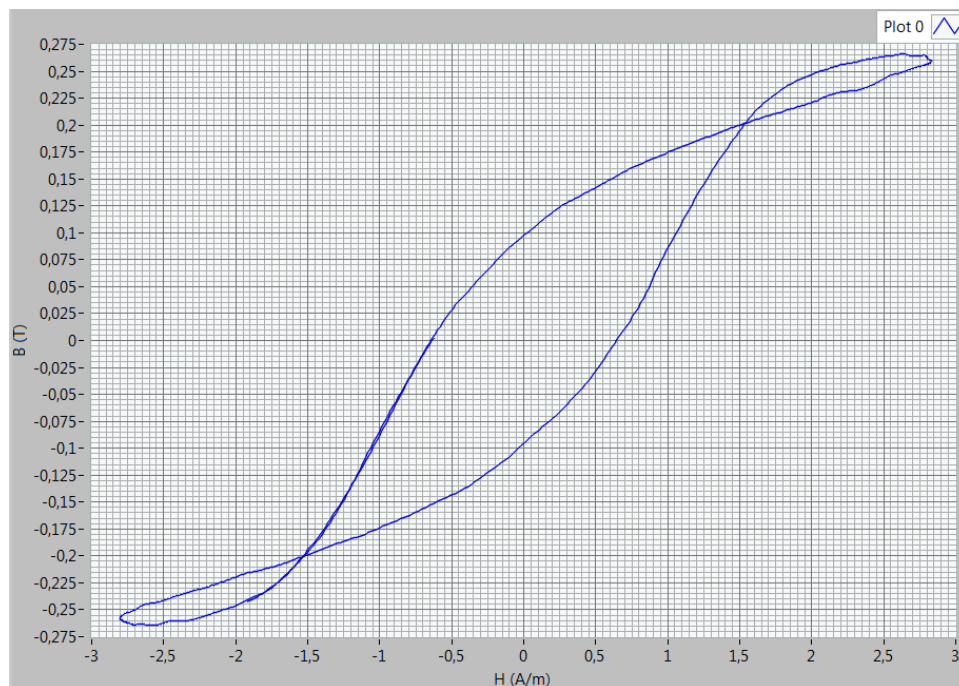
Obr. 6.9) Vykreslení hysterezní smyčky při správném zvolení RC članku u druhého vzorku

Nekorektní hysterezní smyčka měřena při parametrech:

$$f = 58,82 \text{ Hz}$$

$$R = 3 \text{ k} \Omega$$

$$C = 8 \mu\text{F}$$



Obr. 6.10) Vykreslení hysterezní smyčky při špatném zvolení RC článku u druhého vzorku

II. Určení hodnot remanence a koercivity

Zjištěné parametry:

předřadný odpor primárního vinutí = $8,2 \Omega$

Horizontální citlivost osciloskopu = $1 \text{ V/d} = 1 \text{ V/cm}$

Vertikální citlivost osciloskopu = $50 \text{ mV/d} = 50 \text{ mV/cm}$

počet primárních závitů vzorku $N_1=15$ závitů

počet sekundárních závitů vzorku $N_2=300$ závitů

Vnitřní průměr toroidu $D_1=19,6 \text{ mm}$

Vnější průměr toroidu $D_2=31,8 \text{ mm}$

Výška $b=6,1 \text{ mm}$

Šířka $a=12,8 \text{ mm}$

Naměřené hodnoty:									
Hc	0,57397	(A/m)	Br	0,0398369	(T)	Hmax	2,83148 (A/m)	Bmax	0,0985956 (T)
-Hc	-0,582125	(A/m)	-Br	-0,0410335	(T)	-Hmax	-2,80061 (A/m)	-Bmax	-0,0984411 (T)

Obr. 6.11) Charakteristické body pro správně zvolenou hysterezní smyčku u druhého vzorku

Tab. 3) Hodnoty naměřené SW aplikací pro druhý vzorek

H_c (A/m)	B (T)	H_{max} (A/m)	B_{max} (T)	$-H_c$ (A/m)	$-B_r$ (T)	$-H_{max}$ (A/m)	$-B_{max}$ (T)
0,574	0,0398	2,831	0,0986	-0,582	-0,041	-2,8	-0,0984

6.3.2. Měření komutační křivky

I. Měření komutační křivky

Tab. 4) Tabulka získaných hodnot pro komutační křivku druhého vzorku

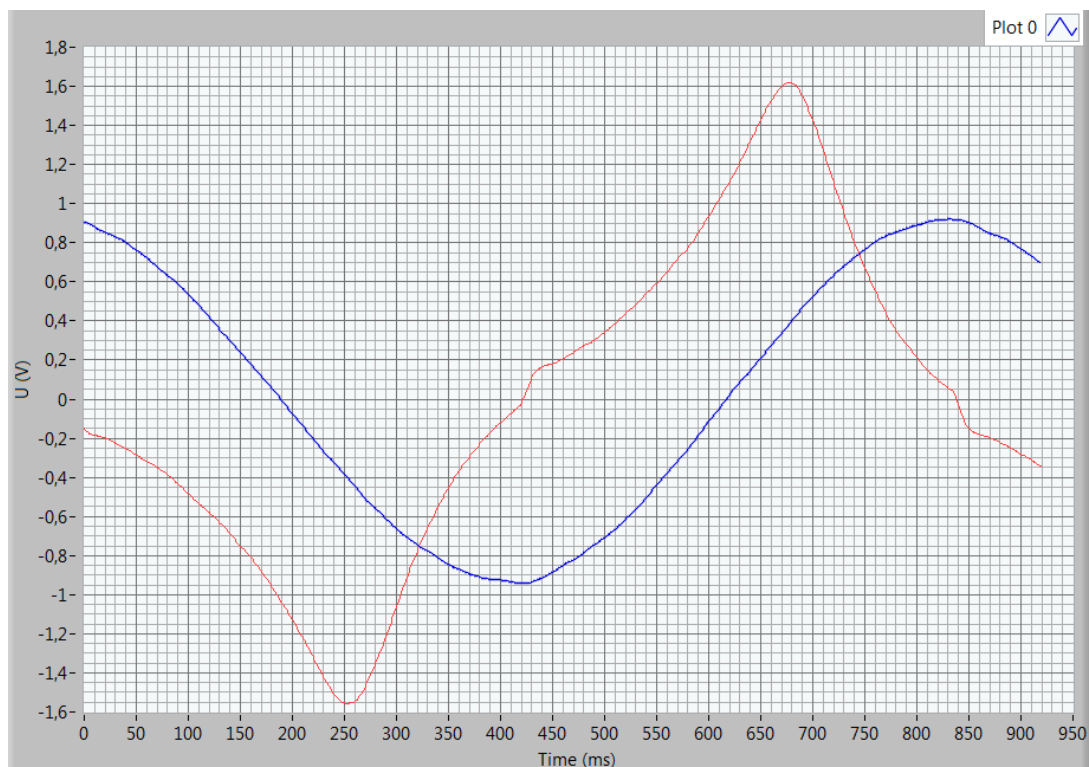
Naměřeno Multimetry		Dopočítáno z naměřených hodnot				
I	U_2	I_m	U_{2SA}	H_{am}	B_{am}	μ_a
(mA)	(mV)	(mA)	(mV)	(A/m)	(T)	(H/m)
0	0	0	0	0	0	-
11,14	43,8	15,75	39,43	2,927	0,0072	1944,91
19,74	93,42	27,92	84,11	5,186	0,0153	2341,01
29,5	169	41,72	152,15	7,7507	0,0276	2833,84
40,01	276,5	56,58	248,94	10,512	0,0452	3418,51
50,5	396	71,42	356,53	13,268	0,0647	3878,95
60,8	513,6	85,98	462,4	15,974	0,0839	4178,61
79,83	719,5	112,9	647,78	20,974	0,1175	4458,36
100,4	901	141,99	811,19	26,379	0,1472	4439,17
119,9	1045	169,56	940,83	31,502	0,1707	4311,29
150,1	1220	212,27	1098,4	39,437	0,1993	4020,59
199,8	1271	282,56	1144,3	52,494	0,2076	3146,74
250	1469	353,55	1322,6	65,683	0,2399	2906,65

Vypočítané hodnoty SW aplikací pro zvýrazněný řádek v tabulce (Tab. 4).

Pro dopočítání doplň:		Dopočítané hodnoty:	
I	79,83 (mA)	Im	112,897 (mA)
U	719,5 (mV)	U2SA	647,778 (mV)
f	58,82 (Hz)	Hm	20,9741 (A/m)
N1	15 (-)	Bm	11,7508 (T)
N2	300 (-)	μ_a	445836 (H/m)
Is	0,08074 (m)		
S	7,81E-7 (m ²)		
		Vypočítat	

Obr. 6.12) Obrázek výsledných hodnot pro vyznačený řádek v tabulce

Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek:



Obr. 6.13) Průběhy napětí bez RC článku pro zvolený řádek u druhého vzorku

Pro ověření dosazení do vzorců:

Střední délka siločáry vzorku:

$$l_s = \pi \cdot \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right) = \pi \cdot \left(\frac{19,6 + 31,8}{2} \right) = 80,74 \text{ mm} = 0,08074 \text{ m} \quad (6.17)$$

Průřez jádra vzorku:

$$S = a \cdot b = 6,1 \cdot 12,8 = 78,1 \text{ mm}^2 = 7,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (6.18)$$

Amplituda magnetizačního proudu:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 79,83 \cdot \sqrt{2} = 112,9 \text{ mA} = 0,1129 \text{ A} \quad (6.19)$$

Amplituda intenzity magnetického pole:

$$H_{am} = \frac{N_1 \cdot I_m}{l_s} = \frac{15 \cdot 0,1129}{0,08074} = 20,974 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.20)$$

Střední aritmetická hodnota indukovaného napětí U_2 :

$$U_{2SA} = \frac{U_2 \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = \frac{719,5 \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = 647,778 \text{ mV} = 0,647778 \text{ V} \quad (6.21)$$

Amplituda magnetické indukce

$$B_{am} = \frac{U_{2SA}}{4 \cdot f \cdot N_2 \cdot S} = \frac{0,647778}{4 \cdot 58,82 \cdot 300 \cdot 7,81 \cdot 10^{-5}} = 0,1175 \text{ T} \quad (6.22)$$

Amplitudová permeabilita:

$$\mu_{am} = \frac{B_{am}}{\mu_0 \cdot H_{am}} = \frac{0,1175}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 20,974} = 4513,84 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.23)$$

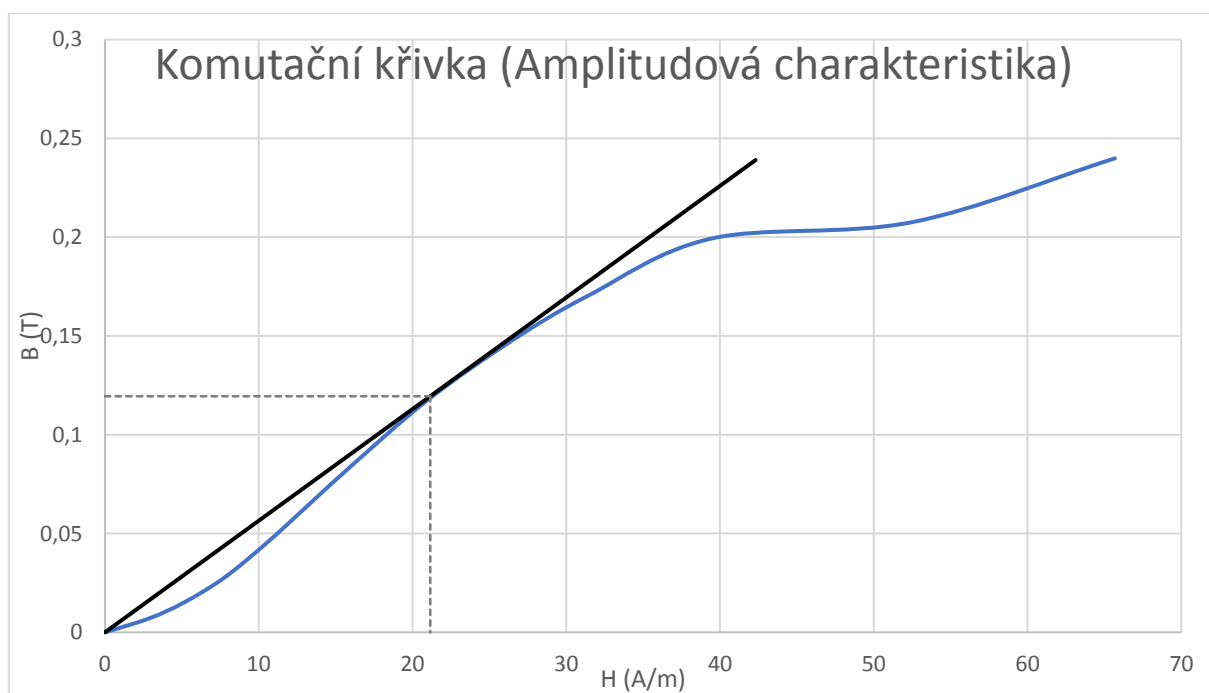
Maximální hodnoty vyčteny z grafu:

$$H_{amax} = 21,155 \text{ A/m}$$

$$B_{amax} = 0,1195 \text{ T}$$

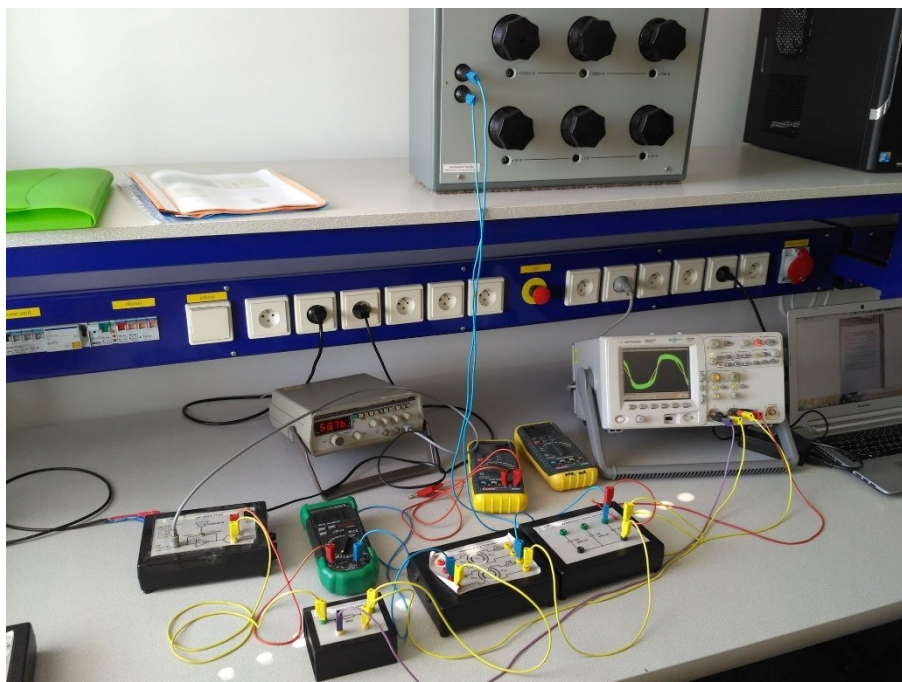
Maximální amplitudová permeabilita:

$$\mu_{amax} = \frac{B_{amax}}{\mu_0 \cdot H_{amax}} = \frac{0,1195}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 21,155} = 4495,16 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.24)$$



Obr. 6.14) Závislost $B_m = f(H_m)$ z měření komutační křivky u druhého vzorku

6.4. Seznam použitých měřících přístrojů



Obr. 6.15) Zapojení pro měření Hysterezní smyčky s RC článkem

Na obrázku (Obr. 6.15) je jedno ze zapojení podle laboratorní úlohy. Konkrétně jde o zapojení měření hysterezní smyčky druhého vzorku, kdy se využívá i RC článek.

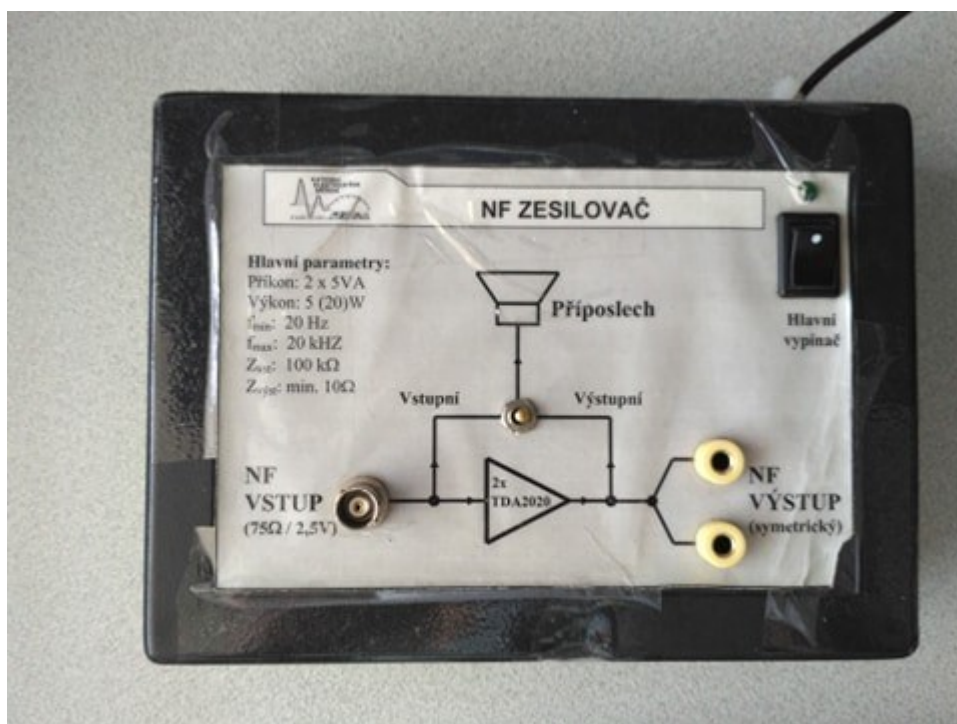
Seznam jednotlivých měřících přístrojů použitých při měření obou vzorků je v tabulce (Tab. 5).

Tab. 5) Použité měřící přístroje

Název	Poznámka
Generátor Instek GFG 8020H	
NF zesilovač	
Multimetr RANGE RE95	
Multimetr MASTECH MS8265	
Přípravek s Toroidy	2 vzorky
Přípravek se snímacím odporem	8R2
Přípravek s kondenzátory	
Odporová dekáda	
Osciloskop Agilent DSO6012A	100MHz



Obr. 6.16) Generátor Instek GFG 8020H



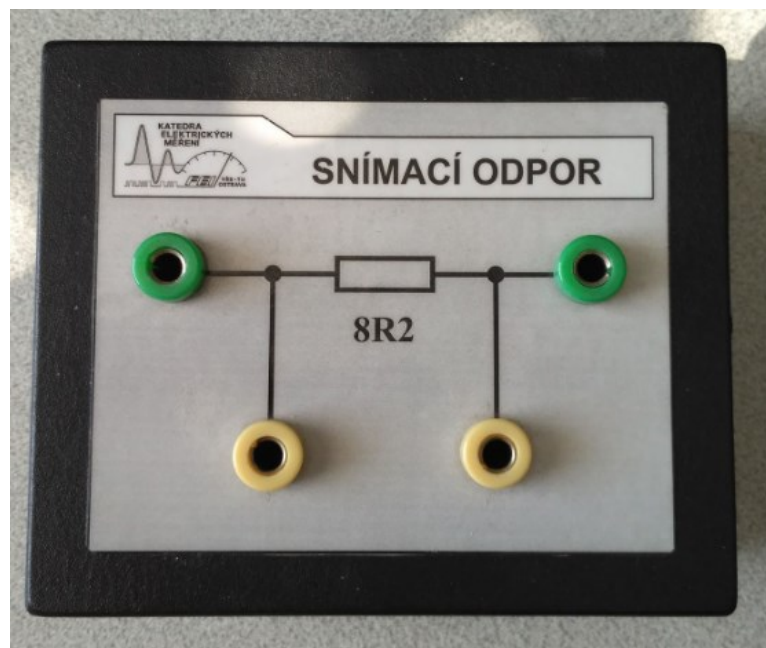
Obr. 6.17) NF zesilovač



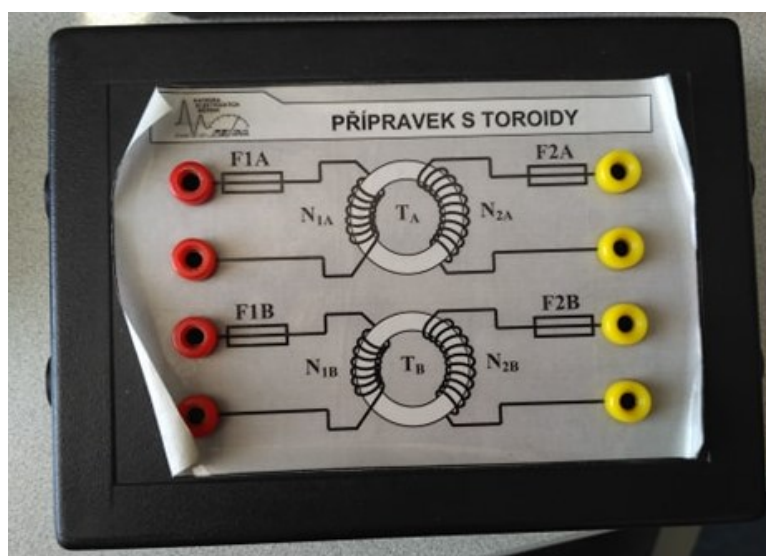
Obr. 6.18) Multimetr RANGE RE95



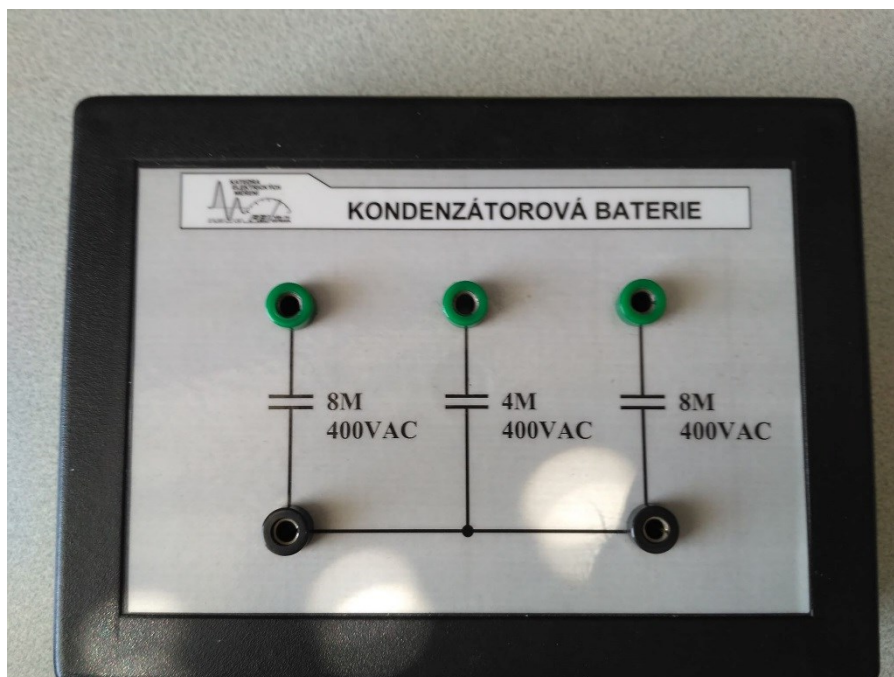
Obr. 6.19) Multimetr MASTECH MS8265



Obr. 6.20) Přípravek se snímacím odporem 8R2



Obr. 6.21) Přípravek s Toroidy



Obr. 6.22) Přípravek s kondenzátory



Obr. 6.23) Odporová dekáda



Obr. 6.24) Osciloskop Agilent DSO6012A

7. Zhodnocení výsledků

Při tvorbě bakalářské práce jsem se seznámil s metodami měření parametrů magnetických materiálů. To zahrnovalo nastudování druhů měření magnetických převodníků a měření při různých situacích, kde se konkrétně jednalo o to, jak postupovat při měření vlastností magneticky tvrdých nebo měkkých vzorků. Zároveň bylo nutno zohlednit, zda pracujeme se vzorky otevřenými nebo uzavřenými. Podle toho, o jaký vzorek šlo, se postupovalo pro získání různých charakteristických hodnot z měření magnetických materiálů.

Další krok pro mě představoval nastudování zobrazení hysterezní smyčky a způsobu její digitalizace. Zde jsem zvolil jako vhodné vývojové prostředí, pro vytvoření softwarové aplikace grafické vývojové prostředí LabVIEW. Zvolené vývojové prostředí umožnilo snadno z použitých měřicích přístrojů digitalizovat data. Současně jsem si nastudoval informace týkající se propojení měřidel s PC přes komunikační rozhraní.

V počátečních fázích tvorby aplikace jsem pracoval s uloženými daty z prvních pokusných měření hysterezní křivky. Cílem bylo zpracovat data a zobrazit z nich výslednou hysterezní křivku. Po dosažení tohoto cíle jsem začal řešit získání charakteristických hodnot ze zobrazené hysterezní křivky. Pro ověřování vhodné vyhledaných hodnot jsem využíval Microsoft Excel, kde lze snadno vyhledávat v naměřených datech.

Po vyhodnocení charakteristických hodnot jsem navrhnul metody centrování hysterezní smyčky. Zde jsem po testování různých metod došel k závěru, že nejvhodnější varianta pro vycentrování vychází z bodu remanence a koercivity. Přesnost vycentrování je zde dosažena na přesnost v řádu několika desetinných míst. Pro vyšší přesnost lze vycentrovanou křivku uložit, načíst znovu a znovu ji vycentrovat.

V neposlední řadě bylo dořešeno ukládání dat a zobrazování jednotlivých kanálů a implementace komunikace s měřicím přístrojem (osciloskopem). Při ukládání dat je potřeba za název souboru dopsat koncovku .csv aby bylo možné s uloženým souborem dále pracovat třeba i v Excelu.

Vzhledem k omezenému režimu na fakultě, kdy nebyl přímý přístup do laboratoře, jsem vycházel většinu času z prvních naměřených dat. Nakonec se však podařilo po otevření laboratoří prakticky odzkoušet vytvořenou SW aplikaci a doladit ji do aktuálního stavu. SW aplikace je otestována a bylo realizováno měření na dvou vzorcích podle laboratorní úlohy.

SW aplikace byla využita k měření tvaru hysterezní smyčky, kdy se vykresluje korektní a nekorektní hysterezní smyčka, na což má vliv nastavení parametrů RC článku.

Nesmím opomenout, že se musí správně nastavit citlivost pro jednotlivé kanály osciloskopu, aby bylo křivku možné vidět s maximem detailů. Pro odstranění šumu je přidán do SW aplikace i filtr, díky němuž mají křivky plynulejší tvar.

Pro získání komunikační křivky je zapotřebí postupovat podle zadání a měřit smyčku při zadaných hodnotách magnetizačního proudu. Ten i napětí na sekundárním vinutí se zaznamenávají do tabulky, kdy slouží k dalším výpočtům pro získání grafické závislosti $B_m = f(H_m)$. Zde softwarová aplikace pouze dopočítá parametry, které se běžně počítaly. Jelikož proud a napětí se měří ručními digitálními multimetry, které nemají komunikační rozhraní, tak se data z nich nedají automaticky

zpracovávat. Zde by stálo tyto měřicí přístroje nahradit digitálními multimetry, které mají komunikační rozhraní, ze kterého by šla data sbírat podobně jako z osciloskopu. Popřípadě by se mohl přidat i generátor s komunikačním rozhraním řízený počítačem. SW aplikace by pak měla být schopná po doplnění načítání přesná data ze všech použitých přístrojů.

Vzhledem k možnosti ukládání dat a centrování hysterezní smyčky pomocí SW aplikace se nabízí možnosti dalších experimentů. Například změna frekvence, jaký má vliv na tvar hysterezní smyčky nebo změna dalších parametrů, které mohou ovlivňovat tvar hysterezní křivky. Naměřená data se pak mohou díky centrování proložit v jednom grafu a porovnávat vliv změny vstupního parametru na tvar křivky.

Během tvorby bakalářské práce jsem získal mnoho zajímavých informací v oblasti měření magnetických materiálů. Nesmím ani opomenout získání nových zkušeností s vývojovým prostředím LabVIEW při tvorbě SW aplikace.

Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] BARTUŠEK, Karel, Eva GESCHEIDTOVÁ, Radek KUBÁSEK, Jan MIKULKA, Jiří REZ a Miloslav STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [2] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. 2. vydání. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01909-8.
- [3] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ: Přístroje a metody*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01717-6.
- [4] FIORILLO, Fausto. *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2004. ISBN 0-12-257251-3.
- [5] DUFEK, Milan, Jaroslav HRABÁK a Zdeněk TRNKA. *Magnetická měření*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [6] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [7] ŽÍDEK, Jan. *MĚŘENÍ ÚTLUMOVÉHO ZKRESLENÍ MĚŘICÍM SYSTÉMEM NA BÁZI VIRTUÁLNÍ INSTRUMENTACE*. Ostrava, 2008. Ostrava, 2008.
- [8] *Losses in Magnetic Materials: 2 Types | Engineering* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/magnetic-materials/losses-in-magnetic-materials-2-types-engineering/42205>
- [9] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Magnetické materiály*. *Magnetické materiály* [online]. Anna Mudruňková, 2016 [cit. 2020-4-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [10] ŽÍDEK, Jan. *Podpora komunikace s měřicími přístroji ve vývojovém prostředí LabVIEW*. Ostrava, 2017.
- [11] JOHNSON, Gary W. a Richard JENNINGS. *LabVIEW graphical programming*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 0-07-145146-3.